

Bertram Wolter

**Versuchskonzept zur Bestimmung der
Biegeweichselfestigkeit von festgewalzten Probekörpern**

eingereicht als

DIPLOMARBEIT

an der

HOCHSCHULE MITTWEIDA

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fakultät Maschinenbau

Mittweida, 2010

Erstprüfer : Prof. Dr.-Ing. Uwe Mahn
Zweitprüfer : Dipl.-Ing. Ulrike Hähnel

Vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am:

Bibliographische Beschreibung

Wolter, Bertram:

Versuchskonzept zur Bestimmung der Biegeweichselfestigkeit von festgewalzten Probekörpern. - 2010. - 132 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida – Fakultät Maschinenbau,
Diplomarbeit - 2010.

Referat:

Ziel der Diplomarbeit ist es ein Versuchskonzept zur Bestimmung der Weichselfestigkeit von festgewalzten Rundproben ausgewählter ADI Gusswerkstoffe mittels der vorhandenen Resonanzprüfstände zu erarbeiten. Dazu ist es notwendig eine für zwei Probendimensionen passende Einspannvorrichtung zu konstruieren. Des weiteren müssen alle relevanten Versuchsparameter ermittelt werden um abschließend eine Aussage über die Steigerung der Biegeweichselfestigkeit in Abhängigkeit der Festwalzparameter und der Probengröße zu treffen.

I Inhaltsverzeichnis

II Abbildungsverzeichnis.....	III
III Tabellenverzeichnis.....	IV
IV Formelverzeichnis.....	V
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Technik.....	3
2.1 Der Werkstoff ADI.....	3
2.2 Festwalzen.....	5
3 Aufgabenstellung.....	8
4 Festigkeitsberechnung für die Probekörper.....	10
4.1 Ermittlung der statischen Bauteilfestigkeit mit örtlichen Spannungen.....	11
4.2 Ermittlung der Dauerfestigkeit mit Nennspannungen.....	13
4.3 Ermittlung der Dauerfestigkeit mit örtlichen Spannungen.....	15
4.4 Gegenüberstellung der ermittelten Prüfkräfte.....	20
5 Konstruktion einer Einspannvorrichtung für gegebene Probengeometrien.....	21
5.1 Entwürfe.....	21
5.2 Konstruktion.....	26
5.3 Festigkeitsberechnung der Einspannvorrichtung.....	28
6 Erstellen des Versuchsplanes für Wöhlerversuche.....	37
6.1 Allgemeines.....	37
6.2 Wöhlerversuch.....	37
7 Zusammenfassung.....	45
V Literatur.....	VIII
VI Anhänge.....	IX
VII Erklärung.....	X

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Einstichverfahren [4].....	5
Abbildung 2.2: axiale Druckeigenspannungen (FE-Analyse) [7].....	6
Abbildung 2.3: Eigenschaftsänderungen beim Festwalzen [4].....	7
Abbildung 4.1: Planares Netz im Bereich der Kerbe.....	15
Abbildung 4.2: dreidimensionales Netz.....	15
Abbildung 4.3: Realisierung der Einspannung und der Krafteinleitung.....	16
Abbildung 4.4: Spannungsverlauf in Randfasernähe für Nenndurchmesser 25mm. .	18
Abbildung 4.5: Spannungsverlauf in Randfasernähe für Nenndurchmesser 30mm. .	19
Abbildung 5.1: Festeinspannung Variante 1.....	22
Abbildung 5.2: Einspannung, Krafteinleitung Variante 1.....	22
Abbildung 5.3: Spannvorrichtung, Variante 2 (Prinzipskizze).....	23
Abbildung 5.4: Maschinenanbindung „POWER SWING NewLine MAG 20kN“.....	24
Abbildung 5.5: Mechanisches Ersatzmodell der Grundplatte.....	28
Abbildung 5.6: Schnittreaktionen.....	29
Abbildung 5.7: Lastverläufe.....	29
Abbildung 5.8: Betrachtete Querschnitte.....	30
Abbildung 5.9: Geometrie der Querschnitte.....	30
Abbildung 5.10: 3-D Modell der oberen Koppelhälfte.....	34
Abbildung 5.11: Pfad für Spannungsgradienten.....	35
Abbildung 5.12: Spannungsgradient der Koppel entlang des Pfades.....	35
Abbildung 6.1: Druckeigenspannungen bei einer Festwalzkraft von 12kN [7].....	40

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Werkstoffkennwerte für ADI nach DIN EN 1564.....	3
Tabelle 2.2: Werkstoffkennwerte für ADI nach ASTM897-90.....	4
Tabelle 2.3: Anhaltswerte für die Dauerfestigkeit.....	4
Tabelle 3.1: zu untersuchende Kombinationen.....	8
Tabelle 4.1: Konstruktionsfaktoren/Dauerfestigkeitswerte/Prüfkräfte.....	14
Tabelle 4.2: Nenndurchmesser/Oberflächenfaktoren.....	17
Tabelle 4.3: Ermittlung der Stützziffern infolge des bezogenen Spannungsgefälles..	18
Tabelle 4.4: Konstruktionsfaktoren; Wechselfestigkeiten; Prüfkräfte.....	19
Tabelle 4.5: Gegenüberstellung der ermittelten Prüfkräfte.....	20
Tabelle 5.1: Verschiedene Varianten.....	21
Tabelle 5.2: Variantenvergleich.....	25
Tabelle 5.3: Eigenschaften von 34CrMo4 (aus Tab. 5.1.4 FKM-Richtlinie).....	27
Tabelle 5.4: Querschnittskennwerte; Nennspannungen.....	31
Tabelle 5.5: Technolog. Größeneinflussfaktor; Bauteilnormwerte.....	31
Tabelle 5.6: Kerbwirkungszahlen Q1 und Q2.....	32
Tabelle 5.7: Kerbwirkungszahlen für Q3.....	33
Tabelle 5.8: Auslastungsgrade für Q1, Q2 und Q3.....	33
Tabelle 5.9: Bezogenes Spannungsgefälle und plastische Stützzahl für die Koppel.	36
Tabelle 6.1: Auswertebeispiel für einen Wöhlerversuch nach dem Treppenstufenverfahren [8].....	39
Tabelle 6.2: Randbedingungen für die Wöhlerversuche.....	41
Tabelle 6.3: geschätzter Einflussfaktor der Oberflächenverfestigung.....	41
Tabelle 6.4: Startwerte für Dauerschwingversuche.....	42
Tabelle 6.5: Ergebnisse der Wöhlerversuche.....	43

IV Formelverzeichnis

1 Indizes

a	Amplitude
b	Biegung
eff	effektiv
ges	gesamt
m	mittel
max	maximal
min	minimal
s	Schub
ungew	nicht festgewalzte Probe
v	Vergleichs-
x	Richtung der Längsachse
zd	Zug, Druck oder Zugdruck
AK	Bauteildauerfestigkeit
BK	Bauteilbetriebsfestigkeit
K	Effektive Kerbspannung
WK	Bauteilwechselfestigkeit
σ	Normalspannung
τ	Schubspannung

2 Kleinbuchstaben

a_{dm} bzw. a_{dp}	Konstante für K_d bezüglich R_m bzw. R_p
a_{BK}	Zyklischer Auslastungsgrad
a_{BKsv}	Zyklischer Auslastungsgrad für zusammengesetzte Spannungen
a_G bzw. b_G	Konstanten für n_σ
$a_{R\sigma}$	Konstante für $K_{R\sigma}$
b	Breite
d	Durchmesser
d_{eff}	effektiver Durchmesser
d_{effm} bzw. d_{effp}	d_{eff} für R_m bzw. R_p
d_{effNm} bzw. d_{effNp}	d_{eff} für R_{mN} bzw. R_{pN}
$f_{W\sigma}$	Zugdruckwechselfestigkeitsfaktor
$f_{W\tau}$	Schubwechselfestigkeitsfaktor

j	Sicherheitsfaktor
$n_{pl\sigma}$	plastische Stützzahl für statische Festigkeit
n_{σ}	plastische Stützzahl für die Ermüdungsfestigkeit
$n_{\sigma r}$	n_{σ} für die Belastung
$n_{\sigma d}$	n_{σ} für die Konstruktion
$p_{\bar{u}}$	Überlebenswahrscheinlichkeit
q	Konstante, steuert Verhältnis von Normalspannungshypothese und Gestaltänderungsenergiehypothese
r	Kerbradius
s	Dicke des Bauteiles / Standardabweichung der Dauerfestigkeit
t	Kerbtiefe

3 Großbuchstaben

A	Fläche
A_5	Bruchdehnung
B	Breite
D	Durchmesser
F	Axialkraft
F_P	Prüfkraft
F_W	Festwalzkraft
G_{σ}	bezogenes Spannungsgefälle
K_d	technologischer Größeneinflussfaktor
K_{dm} bzw. K_{dp}	K_d für R_m und σ_w bzw. für R_p
K_f	Kerbwirkungszahl
K_t	Formzahl
K_A	Anisotropiefaktor
K_{AK}	Mittelspannungsfaktor
K_{BK}	Betriebsfestigkeitsfaktor
K_{NLE}	Konstante zur Berücksichtigung des nichtlinearelastischen Spannungs-Dehnungsverhaltens von GG
$K_{R\sigma}$	Rauheitsfaktor
$K_{SK}; K_{WK}$	Konstruktionsfaktoren
K_T	Temperaturfaktor
K_V	Randschichtfaktor
M_b	Biegemoment
$P_{\bar{u}}$	Überlebenswahrscheinlichkeit

R_e	Streckgrenze
R_m	Bauteilnormzugfestigkeit
R_{mN}	Normwert der Zugfestigkeit für d_{effNm}
R_p	Fließgrenze (verallgemeinert für Streckgrenze und 0,2% Dehngrenze)
R_{pN}	Normwert der Fließgrenze für d_{effNp}
R_Z	mittlere Oberflächenrauheit
R_b	Spannungsverhältnis (für Biegespannung)
S_a	Spannungsamplitude
S_m	Mittelspannung
S_0	kleinster Spannungsausschlag bei dem sich Dauerfestigkeit einstellt
S_{AK}	Amplitude der Bauteildauerfestigkeit
S_{BK}	Amplitude der Bauteilbetriebsfestigkeit
S_{SK}	Statische Bauteilfestigkeit
S_{WK}	Bauteilwechselfestigkeit
\bar{S}	Erwartungswert der Dauerfestigkeit
$\bar{S}(F_w)$	Erwartungswert der Dauerfestigkeit infolge der Festwalzkraft F_w

3 Griechische Buchstaben

ΔS	Spannungsstufenhöhe
σ	örtliche Spannung
σ_w	Bauteilnormwert der Wechselfestigkeit für Normalspannung und d_{effm}
τ	Schubspannung (mit Index s für Schub und Index t für Torsion)
τ_w	Bauteilnormwert der Wechselfestigkeit für Schubspannung und d_{effm}
ω	Neigungswinkel eines geneigten Querschnittsüberganges

1 Einleitung

Obwohl die Kaltumformung als Mittel zur Festigkeitssteigerung beinahe so alt ist wie die Nutzung metallischer Werkstoffe selbst, wurde eine günstige Wirkung einer partiellen Kaltumformung der Bauteiloberfläche auf die Schwingfestigkeit erst gegen Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts beschrieben. Der Anlass dazu war die Entdeckung, dass eine mit einem Hammer eingebrachte Kerbe in einer glatten Welle einen wesentlich geringeren Schwingfestigkeitsverlust verursachte als eine eingefeilte Kerbe gleichen Ausmaßes. Seither wurden die Wirkungsmechanismen der Randschichtverfestigung untersucht und nach Methoden zur Verfahrensoptimierung geforscht. Die verschiedenen, wirkenden Mechanismen der Schwingfestigkeitssteigerung durch Randschichtverfestigung werden in Kapitel 2.2 beschrieben. Ein besonders wirkungsvolles Verfahren zur Verbesserung der „Gestaltfestigkeit“ ist die Entschärfung von Kerbstellen durch das Festwalzen. Um diese Methode wirkungsvoll anzuwenden müssen viele Einflussparameter untersucht und optimiert werden. Im Speziellen wird im Rahmen dieser Arbeit ein Versuchskonzept erarbeitet, das den Einfluss der Festwalzkraft auf die Biege-wechselfestigkeit bei exakt vorgegebenen Geometrien untersucht. Die Versuche sollen an Proben aus einer relativ jungen Werkstoffgruppe durchgeführt werden. Bei dieser Werkstoffgruppe handelt es sich um die Gusseisenwerkstoffe, die unter dem Kürzel ADI geführt werden. Diese Werkstoffgruppe zeichnet sich durch sehr gute Dauerhaltbarkeitswerte aus, die denen konventioneller Gusseisensorten weit überlegen sind. Eine Möglichkeit diese Werte noch zu steigern ist eine mechanische Randschichtnachbehandlung, wie eben das Festwalzen. Um die Dauerfestigkeitswerte zu ermitteln stehen zwei Resonanzprüfstände zur Verfügung, die über maximale Kraftamplituden von 10kN bzw 60kN verfügen. Im Zuge der Untersuchungen ist es nötig für eben diese Prüfstände eine Spannvorrichtung zu entwickeln die ein Prüfen der gegebenen Probenformen unter konstanten, nachvollziehbaren Bedingungen ermöglicht. Das Augenmerk wurde bei der Entwicklung der Spannvorrichtung auf möglichst einfache Herstellbarkeit sowie vielseitige Einsatzmöglichkeiten gelegt. Ausserdem wurde die gesamte Spannvorrichtung für die zu erwartenden Betriebslasten dauerhaft ausgelegt. Die Konstruktion sowie die zugehörige Festigkeitsberechnung wird in Kapitel 5 beschrieben. Kapitel 6 beschäftigt sich mit der Versuchsdurchführung. Um die Anzahl

der Dauerschwingversuche möglichst klein zu halten ist es nötig die Startwerte für die Kraft.- bzw. Spannungsamplituden im Vorfeld möglichst genau abzuschätzen. Für diese Festigkeitsbetrachtungen bietet sich die FKM-Richtlinie an, da sie Spannungsbewertungen verschiedener Art einbezieht. Es wurden allerdings für die Probengeometrien und die verschiedenen Werkstoffe keine Festigkeitsnachweise im eigentlichen Sinn geführt, sondern lediglich Betrachtungen bezüglich der zu erwartenden Dauerhaltbarkeit angestellt. Um die Ergebnisse dieser Untersuchungen genauer präzisieren zu können wurden die Berechnungen der sich voraussichtlich einstellenden Dauerfestigkeit nach zwei verschiedenen Methoden ermittelt. Zum einen, indem die Belastungen mittels Ansetzen einer Nennspannung in die Berechnung einfließen. Bei dieser Methode wird der konstruktive Einfluss über Kerbformzahlen und Werkstoffkonstanten berücksichtigt. Die zweite Methode bezieht den örtlichen Spannungsverlauf an der Kerbstelle in die Berechnung mit ein. Dieser wird mittels einer Finite-Elemente-Analyse der beiden Probendimensionen ermittelt (Kapitel 4). Nach Festlegen der Startwerte für die Wöhlerversuche können die Dauerfestigkeitswerte nach dem Treppenstufenverfahren ermittelt und deren Abhängigkeit von den Einflussparametern des Festwalzens untersucht werden.

2 Stand der Technik

2.1 Der Werkstoff ADI

ADI ist die englische Abkürzung für „Austempered Ductile Iron“, was sinngemäß übersetzt „zwischenstufenvergütetes zähes Eisen“ bedeutet. Gemeint ist damit wärmebehandeltes duktiles Gusseisen mit Kugelgraphit. Der Werkstoff zeichnet sich unter anderem dadurch aus, dass er bei gleicher Bruchdehnung wie konventioneller Sphäroguss eine doppelt so hohe Festigkeit erreicht. ADI weist, wie allgemein für Gusseisen üblich, ein gutes mechanisches sowie auch akkustisches Dämpfungsvermögen auf und hat aufgrund seines hohen Graphitanteils eine etwa 10% geringere Dichte als Stahl. In Bezug auf Werkstoffkennwerte wie die Zugfestigkeit steht ADI vielen Stahlsorten in nichts nach. Allerdings liegt der Elastizitätsmodul mit Werten zwischen ca. 145 MPa und 170 MPa deutlich unter dem von Stahl, was aber konstruktiv ausgeglichen werden kann. Ein entscheidender Vorteil der ADI Werkstoffe gegenüber konventionellen, genormten Gusseisensorten ist das Verhalten unter zyklischen Belastungen, so erreichen die ADI Sorten fast doppelt so hohe Dauerfestigkeitswerte wie die entsprechenden herkömmlichen Gusseisen. In Europa ist ADI in vier Sorten genormt, welche in DIN EN 1564 festgehalten sind. Die nordamerikanische etwas anspruchsvollere Normung nach ASTM A897-90 erfasst fünf Sorten. Die Eigenschaften entsprechend den genannten Normen sind in Tabelle 2.1 und 2.2 dargestellt.

Tabelle 2.1: Werkstoffkennwerte für ADI nach DIN EN 1564

Sorte	Zugfestigkeit R_m [MPa]	0,2% Dehngrenze $R_{p0,2}$ [MPa]	Bruchdehnung A_5 [%]	E-Modul [MPa]	Anhaltswerte für Härte HB
EN-GJS-800-8	800	500	8	$170 \cdot 10^5$	260-320
EN-GJS-1000-5	1000	700	5	$168 \cdot 10^5$	300-360
EN-GJS-1200-2	1200	850	2	$167 \cdot 10^5$	340-440
EN-GJS-1400-1	1400	1100	1	$165 \cdot 10^5$	380-480

Tabelle 2.2: Werkstoffkennwerte für ADI nach ASTM897-90

Sorte	Zugfestigkeit R_m [MPa]	0,2% Dehn- grenze $R_{p0,2}$ [MPa]	Bruchdehnung A_5 [%]	Anhaltswerte für Härte HB
Grade 1	850	550	10	269-321
Grade 2	1050	700	7	302-363
Grade 3	1200	8520	4	341-444
Grade 4	1400	1100	1	388-477
Grade 5	1600	1300	-	444-555

Grundsätzlich werden die ADI-Sorten in 3 Gruppen eingeteilt: zwei zähe Sorten, eine Übergangssorte und eine bzw. zwei hochfeste Sorten, die sich durch eine hohe Härte sowie Verschleissbeständigkeit auszeichnen. Den ADI-Sorten eigen ist, dass die Dauerfestigkeit nicht mit der Zugfestigkeit ansteigt, sondern bei den zähen Sorten (EN-GJS-800-8, EN-GJS-1000-5), welche im Rahmen dieser Diplomarbeit betrachtet werden sollen, am höchsten ist. Tabelle 3 zeigt die Anhaltswerte für die Dauerfestigkeit der zähen ADI Sorten nach DIN EN 1564.

Tabelle 2.3: Anhaltswerte für die Dauerfestigkeit

Anhaltswerte	GJS-800-8	GJS-1000-5
Dauerbiegewechsel- festigkeit, ungekerbt, 10,6 mm Dmr. σ_a [MPa]	375	425
Dauerbiegewechsel- festigkeit, gekerbt, 10,6 mm Dmr. σ_a [MPa]	225	260

Um herkömmliches Gusseisen mit Kugelgraphit zu ADI zu vergüten ist eine spezielle Wärmebehandlung nötig, die hier kurz umrissen werden soll.

Um eine gleichmäßige Austenitisierung sowie Kohlenstoffsättigung des Austenits zu erreichen wird das Gußstück auf eine Temperatur von 840 °C bis 950 °C erhitzt und gehalten. Anschließend wird es auf 230 °C bis 400 °C abgeschreckt und isothermisch bei dieser Temperatur gehalten, bis die komplette Grundmasse die Umwandlung in sogenannten „Ausferrit“ vollzogen hat. Danach folgt die Abkühlung auf Raumtemperatur. Ausferrit ist ein feinkörniges Gemisch aus Ferrit und stabilisiertem Austenit, das die hohe Festigkeit und Zähigkeit des des ADI gewährleistet.

2.2 Festwalzen

Ziel des Festwalzens ist eine Festigkeitssteigerung der Randschicht, wobei der wichtigste Prozeßparameter bei diesem Verfahren die Walzkraft ist. Das grenzt das Festwalzen von anderen Oberflächenverfahren, wie z.B. „Oberflächen-Feinwalzen“, Glattwalzen und Maßwalzen ab, deren Zweck die Herstellung einer glatten Oberfläche bzw. enger Toleranzen ist. Die Hauptanwendung des Festwalzens ist die Bearbeitung von gekerbten rotationssymmetrischen Teilen im sog. Einstichverfahren (Abbildung 2.1).

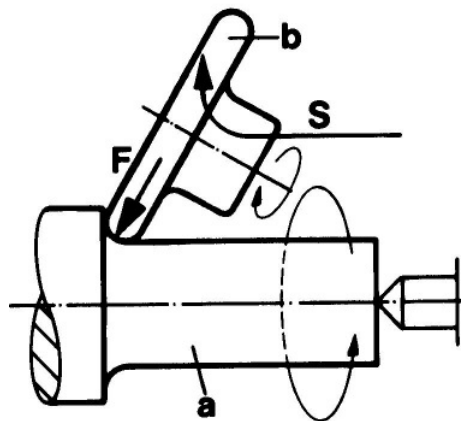


Abbildung 2.1: Einstichverfahren [4]

Der Antrieb erfolgt entweder über das Werkstück oder über die Walzrollen, welche häufig mit Spiel gelagert und durch die Kerbkontur zwangsgeführt werden. Weitere Parameter neben der Festwalzkraft F sind die Überrollzahl bzw. der Vorschub, die Festigkeit und der Elastizitätsmodul des Werkstoffes sowie die Geometrie von Werkstück und Walzrolle. Beim Festwalzen von Umlaufkerben fällt vor allem dem Schmiegungsgrad (Radienverhältnis von Kerbe und Walzrolle) eine große Bedeutung zu, da er maßgeblich die sich einstellende Kontaktlänge sowie die Eindringtiefe und Walzintensität bestimmt. Das Festwalzen führt zu wesentlichen Änderungen der Charakteristika der Oberflächenschicht. U.a. wird die Ausgangshärte, abhängig von den Verfahrensparametern erhöht. Der grundlegende Zweck des Festwalzens ist die Steigerung der Dauerfestigkeitswerte gekerbter Proben. Diese Steigerungen beruhen auf verschiedenen Mechanismen. So wird die Oberflächenrauheit im Bereich der Walzzone eingeebnet, was eine Reduzierung von Mikrokerben darstellt und somit die

Neigung zu Anrissen an der Bauteiloberfläche vermindert. Ein weiterer Mechanismus besteht in der Kaltverfestigung und der Verdichtung des Materials aufgrund der plastischen Deformation der Randschicht, welche allein aber nur einen geringen Zuwachs der Dauerfestigkeitswerte bewirkt. Den Hauptanteil an der Schwingfestigkeitssteigerung haben die durch die plastisch-elastische Verformung eingebrachten Druckeigenspannung in der Randschicht. Diese wirken den Zugspannungen infolge der Belastung eines Bauteiles, welche für ein Fortschreiten von Rissen verantwortlich sind, entgegen. Aufgrund der heutigen Möglichkeiten der Finite Elemente Methode kann man theoretische Aussagen über den Betrag dieser Druckeigenspannungen in Abhängigkeit von der Festwalzkraft treffen. Abbildung 2.2 zeigt den Verlauf der Druckeigenspannungen in Abhängigkeit vom Randfaserabstand, wie er mittels einer plastisch-elastischen Finite Elemente Analyse ermittelt wurde. Der Verlauf der axialen Druckeigenspannung wurde für die Kerbgeometrie der, im Rahmen dieser Diplomarbeit betrachteten, Probengröße mit dem Nenndurchmesser 25mm und einer Walzkraft von 8kN ermittelt. Der Walzrollenradius für diese Simulation war 1,1mm.

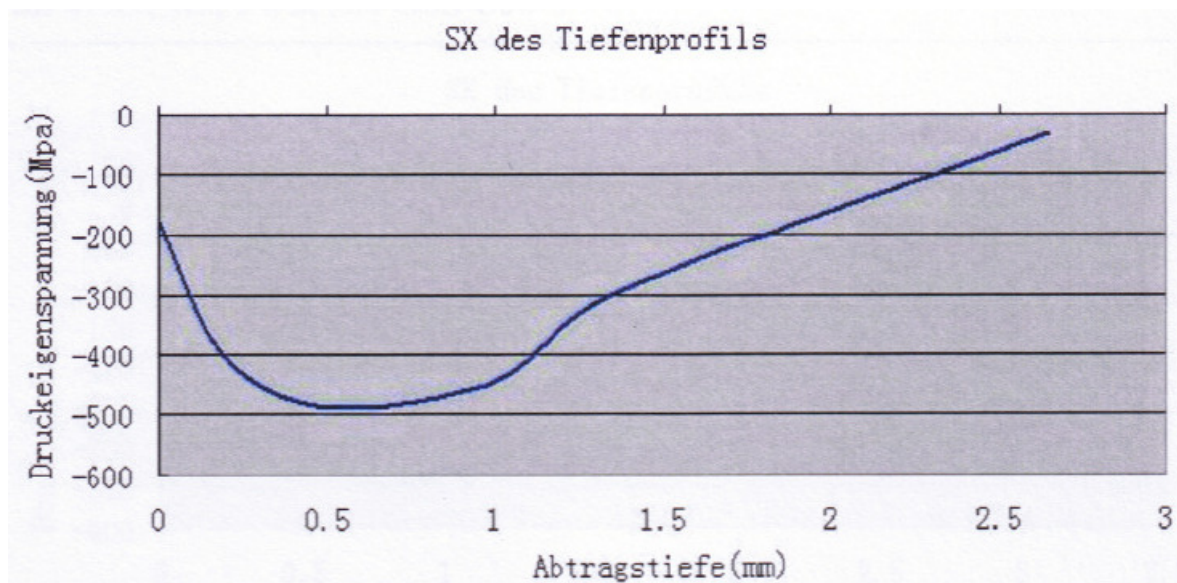


Abbildung 2.2: axiale Druckeigenspannungen (FE-Analyse) [7]

Die verschiedenen Wirkungsmechanismen sind in Abbildung 2.3 noch einmal zusammengefasst.

Wirkungen des Festwalzens	
Eigenspannungen	Randdruckeigenspannungen durch teilplastische Verformung der Randschicht
Randhärte	Randhärtezunahme durch Kaltverfestigung
Randgefüge	z.B. Bildung von Umformmartensit Wirkung auf Eigenspannungen und Härte
Oberflächengüte	Verbesserung durch Einebnung der Rauigkeitsgipfel Verschlechterung durch Oberflächenermüdung
Dichte	Dichtezunahme bei porösen Werkstoffen

Abbildung 2.3: Eigenschaftsänderungen beim Festwalzen [4]

Aufgrund der Vielzahl der Einflussgrößen und der Komplexität des Mechanismus der plastisch-elastischen Umformung der Oberfläche ist die rein theoretische Ermittlung optimaler Festwalzbedingungen schwierig. Deshalb ist die Optimierung der Festwalzbedingungen immer mit theoretischen und experimentellen Untersuchungen verbunden. Allgemein betrachtet weisen Gusseisenwerkstoffe eine geringere absolute Schwingfestigkeit auf als entsprechende Schmiedestähle. Wenn allerdings in durch die Konstruktion vorgegebenen hochbelasteten Bereichen gezielte schwingfestigkeits-steigernde Maßnahmen wie eben das Festwalzen getroffen werden, ist der Ersatz von geschmiedeten Bauteilen durch solche aus Gusseisen durchaus möglich und vor allem wirtschaftlich sinnvoll.

3 Aufgabenstellung

Gegenstand dieser Diplomarbeit soll es nun sein, aufgrund definierter Probengeometrien und festgelegter Festwalzparameter einen Versuchsplan zur Ermittlung der Dauerfestigkeitswerte in 20 Fällen zu erstellen. Diese 20 Fälle umfassen die Kombinationen der zwei ausgewählten ADI Werkstoffe EN-GJS-800-8 und EN-GJS-1000-5, der beiden Probengeometrien mit den Nenndurchmessern 25mm und 30mm und den vier Festwalzkräften F_W (einschließlich der nicht festgewalzten Proben), welche in Tabelle 3.1 gegenübergestellt sind.

Tabelle 3.1: zu untersuchende Kombinationen

Fall	Werkstoff	Nenn- durch- messer d_N [mm]	Kerb- durch- messer d_K [mm]	Kerbradius R [mm]	Profilradia s r_R [mm]	Festwalz- kraft F_W [kN]
1	EN-GJS- 800-8	25	24,2	1,1	1,1	0
2						6
3						8
4						10
5						12
6		30	29,2	1,5	1,45	0
7						6
8						8
9						10
10						12
11	EN-GJS- 1000-5	25	24,2	1,1	1,1	0
12						6
13						8
14						10
15						12
16		30	29,2	1,5	1,45	0
17						6
18						8
19						10
20						12

Um die Dauerfestigkeitswerte der einzelnen Fälle zu ermitteln ist eine Spannvorrichtung zu konstruieren, mittels derer die beiden Probengeometrien in die vorhandenen Resonanzprüfstände eingespannt werden können. Ausserdem wird basierend auf der FKM-Richtlinie eine Möglichkeit aufgezeigt, wie von den erhaltenen Dauerfestigkeitswerten Rückschlüsse auf den Einflussfaktor der Oberflächennachbehandlung gezogen werden können. Die Dauerfestigkeitswerte werden durch Wöhlerversuche im Treppenstufenverfahren ermittelt (Kapitel 6).

4 Festigkeitsberechnung für die Probekörper

Um die Versuchsparameter für die gegebenen Probengeometrien und Werkstoffe vorab festzulegen soll im folgenden Kapitel eine Festigkeitsbetrachtung nach den anerkannten Regeln der Technik erfolgen, speziell nach der FKM-Richtlinie, da diese neben dem klassischen, analytischen Ansatz auch die Auswertung von Finite-Elemente Analysen mit einbezieht. Um einen ersten Anhaltspunkt über die zu erwartende statische Maximallast, welche das Wöhlerliniendiagramm nach oben hin begrenzt zu erhalten bietet die FKM-Richtlinie zwei Möglichkeiten der Berechnung an. Die erste Möglichkeit, ist die Ermittlung der maximalen statischen Spannung nach dem Nennspannungskonzept (Kapitel 1: Statischer Festigkeitsnachweis mit Nennspannungen). Diese Herangehensweise der Berechnung wird für die betrachteten Werkstoffe allerdings durch die Richtlinie von vornherein ausgeschlossen. „Für GGG-Sorten und Aluminiumknetwerkstoffe mit geringer Bruchdehnung, $A < 12,5 \%$, für alle Sorten GT und GG sowie für Aluminiumgusswerkstoffe ist der statische Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen nach Kapitel 3 durchzuführen.¹“ Da sowohl der Werkstoff ADI 800 (EN-GJS-800-8) mit 8% als auch der Werkstoff ADI 1000 (EN-GJS-1000-5) mit einer Bruchdehnung von 5% deutlich unter dieser Grenze liegt, soll an dieser Stelle auf die Berechnung der maximal ertragbaren statischen Last mit Nennspannungen verzichtet werden. Stattdessen wird die statische Maximallast nach Kapitel 3 der FKM Richtlinie (Statischer Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen) unter Zuhilfenahme einer FEM-Analyse ermittelt.

1 FKM-Richtlinie 5. erweiterte Ausgabe 2003 Kapitel 1.0 Allgemeines

4.1 Ermittlung der statischen Bauteilfestigkeit mit örtlichen Spannungen

Die FKM-Richtlinie sieht zur Bewertung der maximal ertragbaren statischen Spannung eine Anpassung der Bauteilnormwerte der Zugfestigkeit R_m und der Streckgrenze R_p an die gegebenen Bauteilabmessungen über einen technologischen Größenfaktor $K_{d,m}$ bzw. $K_{d,p}$ vor. Dieser Größeneinflussfaktor berücksichtigt die in den meisten Fällen mit steigender Bauteilgröße abnehmenden Festigkeitswerte. Dazu wird der vorliegende effektive Durchmesser d_{eff} an der betrachteten Stelle gemäß Tabelle 3.2.3 (FKM-Richtlinie) und des entsprechenden Falles in Relation zu einer festgelegten Grenze ($d_{\text{eff},N,m}$ bzw. $d_{\text{eff},N,p}$) gesetzt um anschließend Rückschlüsse auf den technologischen Größeneinflussfaktor K_d zu ziehen. In den hier vorliegenden Fällen gilt nach Gleichung 3.2.8 (FKM-Richtlinie) $K_{d,m}=K_{d,p}=1$. Es ist also kein Größeneinfluss auf die Festigkeitswerte zu erwarten. Ebenso wird ein Einfluss von Werkstoffanisotropie sowie der Temperatur ausgeschlossen. Demzufolge entsprechen in den hier betrachteten vier Fällen die Probenstücknormwerte der Werkstofffestigkeit den Bauteilnormwerten. Um den Einfluss der Konstruktion in den Berechnungsgang mit einzubeziehen wird in Kapitel 3.3 (FKM-Richtlinie) der Konstruktionsfaktor $K_{SK,\sigma}$ eingeführt. Dieser ist als Kehrwert der sogenannten plastischen Stützzahl n_σ definiert. Gleichung 3.3.7 (FKM-Richtlinie) besagt jedoch, dass für Gusseisensorten mit Kugelgraphit und einer Bruchdehnung, die unter 8% liegt (das ist sowohl für EN-GJS-800-8 als auch für EN-GJS-1000-5 zutreffend) die plastischen Stützzahlen nicht anzuwenden sind, da Spannungsspitzen aufgrund mangelnder Plastizität nicht durch Fließen abgebaut werden können. Um die bei den meisten metallischen Werkstoffen charakteristisch höhere Druckfestigkeit, bezogen auf die Zugfestigkeit zu berücksichtigen wird zur Berechnung der Bauteilfestigkeit noch der Druckfestigkeitsfaktor f_σ eingeführt, welcher aber laut Kapitel 3.2.4 (FKM-Richtlinie) für Zugspannungen den Wert 1 erhält. Da in den betrachteten Fällen reine symmetrische Biegung vorherrscht und deshalb die Randfaserspannungen im Zug- und Druckbereich betragsmäßig gleich sind, soll hier nur die Zugseite betrachtet werden. So ergibt sich ein Konstruktionsfaktor von 1 und die maximal ertragbare, statische Spannung an der betrachteten Stelle entspricht der Bauteilnormfestigkeit, welche wiederum den genormten Festigkeitswerten entspricht. Im Folgenden werden Betrachtungen zu der sich voraussichtlich einstellenden Dauerfestigkeit in den gegebenen vier Fällen angestellt. Diese vier Fälle behandeln die beiden

Probengeometrien gemäß den Zeichnungen 1012-14 und 1012-15 mit den Nenndurchmessern $d=25\text{mm}$ und $d=30\text{mm}$ und entsprechend jeweils die beiden Werkstoffe ADI 800 und ADI 1000.

4.2 Ermittlung der Dauerfestigkeit mit Nennspannungen

Da es sich im vorliegenden Fall nicht um einen Festigkeitsnachweis für einen gegebenen konstruktiven Fall handelt, sondern von der theoretisch ertragbaren Spannung auf die einzuleitende Last zurückgerechnet werden soll, entfallen die Betrachtungen über die Spannungskollektivkennwerte. Es wird von einem Einstufenkollektiv mit einem Spannungsverhältnis von -1 (rein wechselnde Biegung) ausgegangen. Aus diesem Grund beginnt die Berechnung mit der Ermittlung der Werkstoffkennwerte. Laut der FKM-Richtlinie wird die Normteitzugdruckwechselspannung σ_{Wzd} über den sogenannten Zugdruckwechselspannungsfaktor $f_{W\sigma}$ aus der Zugfestigkeit R_m berechnet. Damit erhält man für den ADI 800 ($R_m=800\text{MPa}$) einen Normteildauerfestigkeitswert von 272 MPa und für den ADI 1000 ($R_m=1000\text{MPa}$) einen Wert von 340 MPa. Den Zugdruckwechselspannungsfaktor $f_{W\sigma}$ entnimmt man der Tabelle 2.2.1 (FKM-Richtlinie). Da die Versuche bei Raumtemperatur erfolgen sollen, wird der Temperaturfaktor K_T für normale Temperatur (bei Eisengusswerkstoff ab - 25°C bis + 100°C²) mit einem Wert von $K_T=1$ festgelegt. Um den Einfluss der Geometrie auf die Dauerfestigkeit zu bestimmen werden nach Kapitel 2.3 der FKM-Richtlinie verschiedene Konstruktionskennwerte eingeführt, die für den vorliegenden Fall maßgeblich in einem Konstruktionsfaktor K_{Wkb} zusammengefasst werden. Die Festigkeitsberechnung auf der Grundlage von Nennspannungen erfasst den Einfluss der Bauteilgeometrie, vornehmlich der Kerbwirkung an kritischen Querschnitten, über Formzahlen und Stützzahlen. Die im gegebenen Falle vorliegende Kerbe (Absatz mit Freistich Form D) kann mittels einer Überlagerung der beiden Formzahlen für Absatz und für Umlaufkerbe nach Kapitel 5.2.1.3 der FKM-Richtlinie berechnet werden. Die Stützzahl n_σ berücksichtigt die Stützwirkung des umgebenden Materials, welche die Spitzenspannung im Kerbgrund mit trägt. Für die Stützzahl ist das bezogene Spannungsgefälle maßgeblich, welches aus der Tabelle 2.2.3 ermittelt werden kann. Im Kapitel 2.3.2.1 der FKM-Richtlinie werden zur Erfassung der Kerbwirkungszahl jeweils eine Stützzahl in Abhängigkeit vom Kerbradius und vom Durchmesser des Kerbquerschnittes herangezogen. Desweiteren gehen in den Konstruktionsfaktor noch Einzelfaktoren wie der Rauheitsfaktor und der Randschichtfaktor ein, von denen dem Letzteren im Sinne dieser Diplomarbeit ein größeres Augenmerk

2 FKM-Richtlinie 5. erweiterte Ausgabe 2003 Kapitel 2.2.3.1 Normale Temperatur

gewidmet werden soll, da er den Einfluss einer Oberflächenverfestigung wie z.B. durch Festwalzen berücksichtigt. Zwar existieren für diesen Faktor bereits Tabellenwerte, die aber in Hinsicht auf ihre Abhängigkeit von den Verfahrensparametern des Festwalzens keinerlei Rückschlüsse zulassen. Nach dem Zusammentragen der verschiedenen Einflussfaktoren kann nun der Konstruktionsfaktor für Biegung K_{WKb} berechnet werden, welcher für alle vier Fälle mit den entsprechenden Dauerfestigkeitswerten in folgender Tabelle dargestellt ist.

Tabelle 4.1: Konstruktionsfaktoren/Dauerfestigkeitswerte/Prüfkräfte

$d_{nenn}/\text{Werkstoff}$	K_{WKb}	$S_{WKb}[\text{MPa}]$	$F_{PN} [\text{kN}]$
25mm/ADI 800	1,37	199	4,1
25mm/ADI 1000	1,43	237,1	4,9
30mm/ADI 800	1,36	199,7	6
30mm/ADI1000	1,42	239	7,22

Bei der Betrachtung ist auffällig, dass die Differenz der Nenndurchmesser von 5mm keine signifikante Auswirkung auf die berechneten Dauerfestigkeitswerte hat. Die höhere Zugfestigkeit des ADI 1000 bewirkt allerdings eine stärkere Abschwächung der Dauerfestigkeitswerte, was sich im Konstruktionsfaktor ausdrückt, der bei dem härtesten Material jeweils um 0,06 höher liegt. Das ist auf den Einfluss der Zugfestigkeit auf den Rauheitsfaktor zurückzuführen, welcher in den Berechnungen zur Dauerfestigkeit mit Nennspannungen im Anhang deutlich wird.

4.3 Ermittlung der Dauerfestigkeit mit örtlichen Spannungen

Die zweite Möglichkeit der Spannungsbewertung, die die FKM-Richtlinie anbietet, ist die Bewertung unter Betrachtung der örtlichen Kerbspannung. Um diese zu ermitteln, wurde eine Finite Elemente Analyse der beiden Probendimensionen durchgeführt. Einzelheiten bezüglich der Vernetzung bzw. den Randbedingungen sind in den Bildern 4.1 bis 4.3 ersichtlich. Als Elemente wurden parabolische Solid95 Elemente ausgewählt. Als Grundmodell diente eine planare Vernetzung mit Plane82 Elementen (Abbildung 4.1).

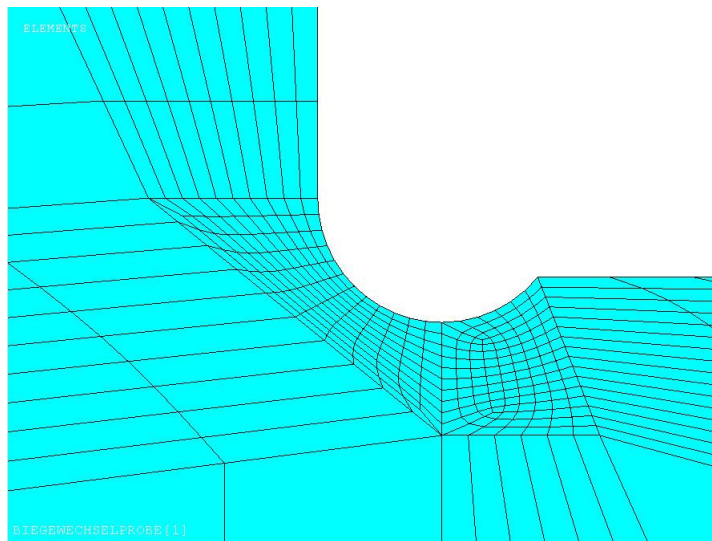


Abbildung 4.1: Planares Netz im Bereich der Kerbe

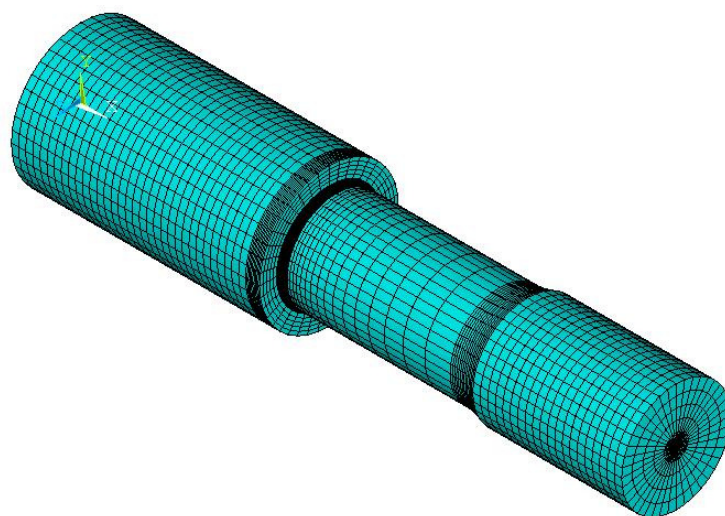


Abbildung 4.2: dreidimensionales Netz

Diese wurde unter Nutzung der quaderförmigen Elemente um die x-Achse rotiert. Dabei gab das System Warnungen aus, die auf zu stark verzerrte Elemente hinwiesen. Nach Aufrufen des „check“ Befehles wurde ersichtlich, dass die Elemente mit Konturwarnungen ausschließlich in für die Simulation nicht relevanten Bauteilabschnitten lagen. Den größten Anteil an Elementen mit Warnungen machten die degenerierten Quaderelemente entlang der Rotationsachse aus, welche aber einen nur sehr schwach beanspruchten Bereich darstellt. Das so erhaltene Netz wurde für die Analysen verwendet (Bild 4.2). Um die Einspannung zu realisieren wurden die Knoten auf dem Umfang der fest eingespannten Seite in allen Freiheitsgraden festgelegt. Um die Prüflast aufzubringen wurde auf einige Knoten an der Stelle der Krafteinleitung verteilt die vertikale Last von 1370N aufgebracht (Abb. 4.3)

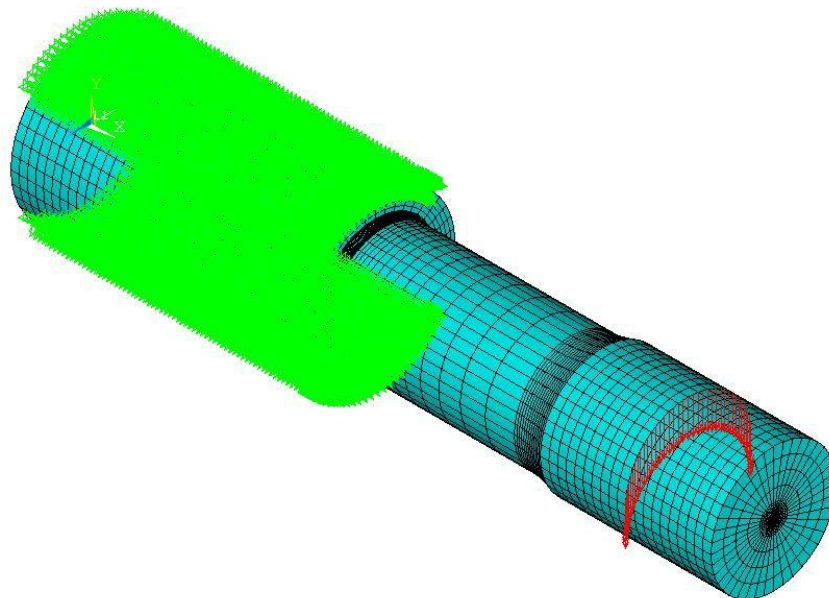


Abbildung 4.3: Realisierung der Einspannung und der Krafteinleitung

Der Einfluss aller konstruktiven Faktoren auf die dauerhaft ertragbare Spannungsamplitude wird wie bei der Betrachtung mit Nennspannungen in einem Konstruktionsfaktor $K_{WK,\sigma}$ zusammengefasst. Dieser Faktor setzt sich zusammen aus den Einzelfaktoren: n_σ (Stützzahl), K_f (werkstoffspezifische Konstante), $K_{R,\sigma}$ (Einflussfaktor der Oberflächenrauheit), K_v (Randschichtfaktor), K_s (Schutzschichtfaktor) und K_{NLE} (Konstante für Grauguss). Anders als bei der Spannungsbewertung mit Nennspannungen wird bei der Betrachtung der örtlichen

Spannungen der Kerbeinfluss nicht über Formzahlen bestimmt sondern aus der Stützziffer, welche sich aus dem Spannungsgradienten im Kerbgrund berechnet. Die einzigen Faktoren, die für die vier betrachteten Fälle unterschiedlich sind, sind die Stützzahlen, da diese von der Kerbgeometrie abhängig sind und der Oberflächenfaktor, da dieser von der Zugfestigkeit beeinflusst wird. Nachfolgend sind die Einflussfaktoren für die Dauerfestigkeit tabellarisch zusammengefasst.

Tabelle 4.2: Nenndurchmesser/Oberflächenfaktoren

Werkstoff	Nenndurchmesser	$K_{R,\sigma}$
EN-GJS-800-8	25mm	0,91
	30mm	0,91
EN-GJS-1000-5	25mm	0,89
	30mm	0,89

Zur Ermittlung der Stützziffer wird das bezogene Spannungsgefälle direkt aus der Finite-Elemente-Analyse herangezogen. Um den Spannungsverlauf im Kerbgrund bis 1mm unter die Bauteiloberfläche hinreichend genau aufzulösen befindet sich im FEM Modell (Abbildung 4.1) eine Linie senkrecht zur Oberfläche, die auf einer Länge von 1mm 10 Knoten aufweist. Dadurch ist es möglich gemäß der Entsprechenden Gleichung den maximalen Spannungsgradienten senkrecht zur Spannungsrichtung (in diesem Fall Zugspannung in X-Richtung infolge Biegung) zu ermitteln. Tabelle 4.3 zeigt die berechneten Gradienten in Abhängigkeit vom Randfaserabstand. Dabei ist $\sigma_{x,1}$ immer die Randfaserspannungsamplitude und $\sigma_{x,2}$ immer die Spannungsamplitude an einer Stelle im Abstand von Δs zur Randfaser. Zur Berechnung der Dauerfestigkeit wird die Stützziffer, die aus dem größten Spannungsgefälle resultiert, verwendet. Das bezogene Spannungsgefälle wird hier mit G_σ bezeichnet. Die unterschiedlichen Stützzahlen für die verschiedenen Werkstoffe ergeben sich aus dem Zugfestigkeitseinfluss auf die Stützziffer. Abbildung 4.4 und Abbildung 4.5 zeigen den Verlauf der Zugspannung in X-Richtung an der Kerbstelle in Abhängigkeit vom Randfaserabstand.

Tabelle 4.3: Ermittlung der Stützziffern infolge des bezogenen Spannungsgefälles

Werkstoff	Nenn- durch- messer	Δs [mm]	$\sigma_{x,1}$ [MPa]	$\sigma_{x,2}$ [MPa]	G_{σ} [1/mm]	n_{σ}
ADI-800	25mm	0,1	169,73	141,35	1,67	1,57
		0,2	169,73	122,51	1,39	1,54
		0,3	169,73	108,43	1,2	1,53
	30mm	0,1	238,43	208,35	1,26	1,53
		0,2	238,43	185,38	1,11	1,52
		0,3	228,43	167,52	0,99	1,5
ADI-1000	25mm	0,1	169,73	141,35	1,67	1,49
		0,2	169,73	122,51	1,39	1,47
		0,3	169,73	108,43	1,2	1,46
	30mm	0,1	238,43	208,35	1,26	1,46
		0,2	238,43	185,38	1,11	1,45
		0,3	228,43	167,52	0,99	1,43

ZUGSP

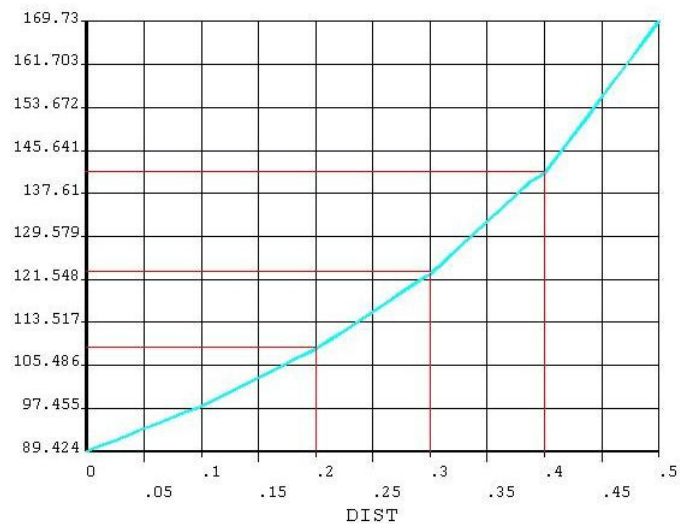


Abbildung 4.4: Spannungsverlauf in Randfasernähe für Nenndurchmesser 25mm

ZUGSP

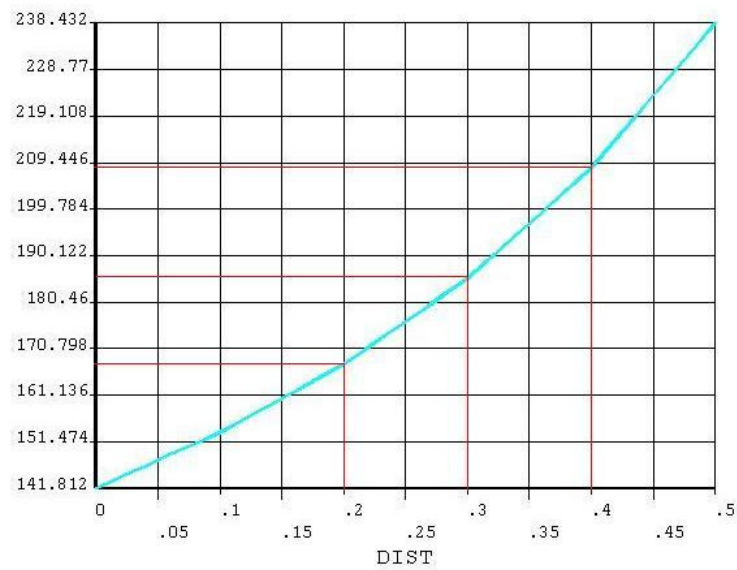


Abbildung 4.5: Spannungsverlauf in Randfasernähe für Nenndurchmesser 30mm

Damit ergeben sich die Konstruktionsfaktoren $K_{WK,\sigma}$ für die Dauerfestigkeitswerte $\sigma_{W,K}$ sowie die erforderlichen Prüfkkräfte gemäß Tabelle 4.4.

Tabelle 4.4: Konstruktionsfaktoren; Wechselfestigkeiten; Prüfkkräfte

Werkstoff	Nenndurchmesser [mm]	$K_{WK,\sigma}$	$\sigma_{W,K}$ [MPa]	$F_{P\ddot{o}}$ [kN]
EN-GJS-800-8	25	0,52	520	4,2
	30	0,54	507,19	6,38
EN-GJS-1000-5	25	0,56	611,44	4,94
	30	0,57	597,7	7,52

4.4 Gegenüberstellung der ermittelten Prüfkkräfte

Bei einer direkten Gegenüberstellung der erforderlichen Prüfkkräfte, die mittels Nennspannungen und mittels örtlichen Spannungen ermittelt wurden, lässt sich feststellen, dass beide Methoden annähernd gleiche Ergebnisse liefern. So lässt sich der Versuchsrahmen, in dem sich Dauerfestigkeit einstellen sollte, auf ein vernünftiges Maß eingrenzen.

Tabelle 4.5: Gegenüberstellung der ermittelten Prüfkkräfte

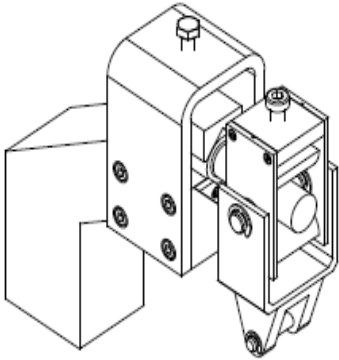
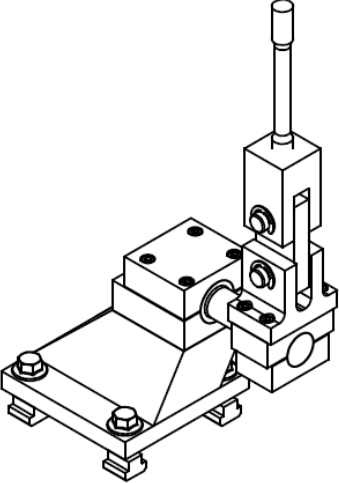
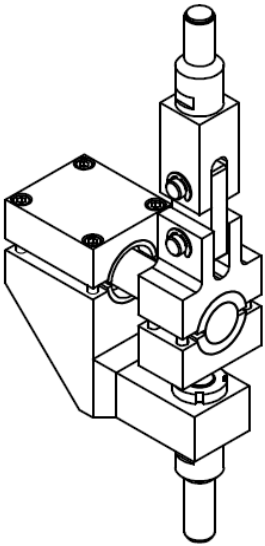
Werkstoff	Nenn Durchmesser [mm]	F_{PN} [kN]	F_{p0} [kN]
EN-GJS-800-8	25	4,1	4,2
	30	6	6,38
EN-GJS-100-5	25	4,9	4,94
	30	7,22	7,52

5 Konstruktion einer Einspannvorrichtung für gegebene Probengeometrien

5.1 Entwürfe

Im Zuge der Entwicklung eines konstruktiven Entwurfes entstanden drei verschiedene Varianten, aus denen dann die geeignetste ausgewählt wurde. Die Entwurfsskizzen für die einzelnen Varianten sind in Tabelle 5.1 zu finden.

Tabelle 5.1: Verschiedene Varianten

Variante 1	Variante 2	Variante 3
		

Der erste Entwurf sieht die Verwendung von starken Stahlblechen vor um den Fertigungsaufwand relativ gering zu halten. Die feste Einspannung der Probekörper wird bei diesem Entwurf durch zwei Spannprismen in Verbindung mit einem Bügel aus 10 mm starkem Blech realisiert. Die Spannkraft wird auf den Probekörper mittels einer Sechskantschraube aufgebracht, welche das obere Prisma auf den Prüfling presst (Abbildung 5.1). Das untere Spannprisma ist eine V-Nut, die horizontal in den Grundkörper gefräst ist. Auf der Seite der Krafteinleitung wird die Einspannung durch zwei Spannkörper realisiert, welche den Probekörper nur an jeweils einem Punkt berühren sollen. Diese beiden Spannkörper befinden sich in einem Rahmen aus drei Blechen und das Spannen wird durch eine Innensechskantschraube erreicht. Der Rahmen, der als Aufnahme für die beiden Spannkörper dient, befindet sich

seinerseits über zwei Bolzen gelenkig gelagert in einem zweiten Blechrahmen, welcher mittels eines zweiten Gelenkes die Anbindung an die Erregerseite der Maschine ermöglichen soll (Abbildung 5.2).

Dabei fällt auf, dass eine Konstruktion auf der Grundlage von Blechen unter einer hochgradig dynamischen, dauerhaften Belastung höchstwahrscheinlich nicht die geforderte Haltbarkeit bringen wird.

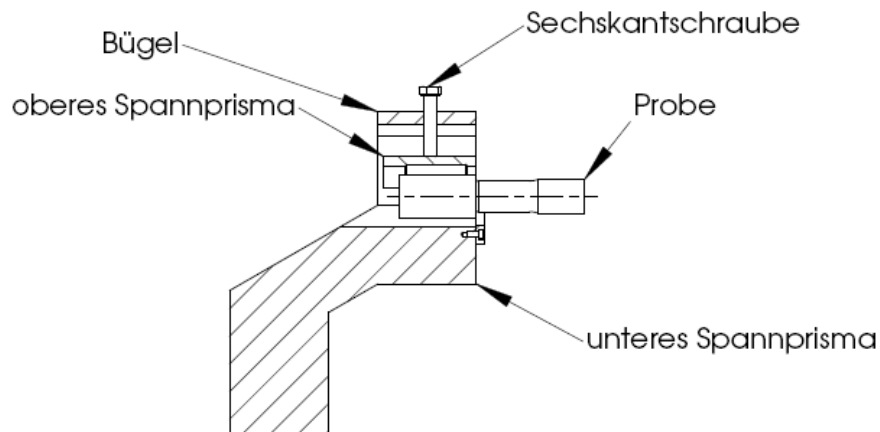


Abbildung 5.1: Festeinspannung Variante 1

Ausserdem fallen die Anbindungen an die Resonanzprüfmaschine nicht massiv genug aus und die Befestigung der fest eingespannten Seite gestaltet sich schwierig. Ebenso besteht diese Variante der Einspannvorrichtung aus sehr vielen Einzelteilen, von denen einige einen erheblichen Fertigungsaufwand mit sich bringen. Ein weiterer

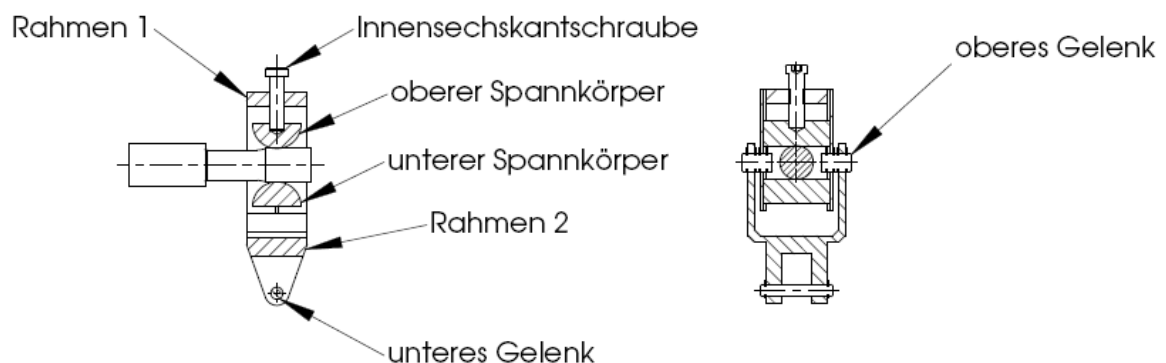
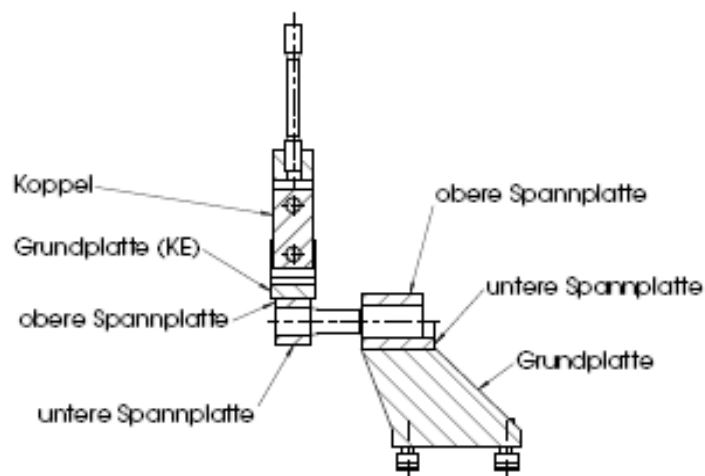


Abbildung 5.2: Einspannung, Krafteinleitung Variante 1

sich ergebender Nachteil ist, dass diese Spannvorrichtung sehr unflexibel wäre, wenn es darum geht andere Prüfkörpergeometrien als die zwei gegebenen zu spannen.

Die zweite Variante ist in ihrer Ausführung massiv gestaltet, d.h. sie besteht aus gefrästen Teilen. Auf Seiten der Festeinspannung der Probe ist konstruktiv eine massive Grundplatte vorgesehen, die mittels vier T-Nutensteinen am Maschinentisch befestigt wird. Diese Grundplatte ist auf ihrer Oberseite plan gefräst und weist vier Gewindebohrungen auf um die Spannplatte der Festeinspannung aufzunehmen. Diese Spannplatte existiert in zwei Varianten, jeweils eine entsprechend den beiden gegebenen Probennendurchmessern.



*Abbildung 5.3: Spannvorrichtung, Variante 2
(Prinzipskizze)*

Die Spannplatten weisen hierbei als Geometrie zum Spannen Halbzylinder auf, die den Außendurchmessern der Proben (Passung H7/g6) entsprechen. Es existiert jeweils eine Platte, die mit der entsprechenden Grundplatte verbunden ist und jeweils eine, die das Spannen realisiert. Diese Variante ist wesentlich solider und zudem vom Fertigungsaufwand her vertretbar. Allerdings ist die Herstellung der Spannplatten mit gewissem Aufwand verbunden. Dieser Entwurf würde sich auch zur Prüfung anderer Probengeometrien eignen, sofern man für diese dann eigene Spannmittel zu den Grundplatten anfertigen würde. Ein entscheidendes Problem dieser Konstruktion ist die feste Montage auf dem Maschinentisch. Da sich sowohl beim „POWER SWING NewLine MOT 150kN“ als auch beim „POWER SWING

NewLine MAG 20kN“ die Kraftaufnehmer immer auf der gegenüberliegenden Seite der Krafteinleitung befinden, stünde die vom Hersteller vorgesehene Möglichkeit der Regelung nicht mehr zur Verfügung. Deshalb hätte man die Prüfkraft auf andere Art und Weise, z.B mittels Dehnmessstreifen messen müssen. Dies wäre aber sehr aufwändig und zudem wesentlich ungenauer als die eingebaute Kraftmessdose.

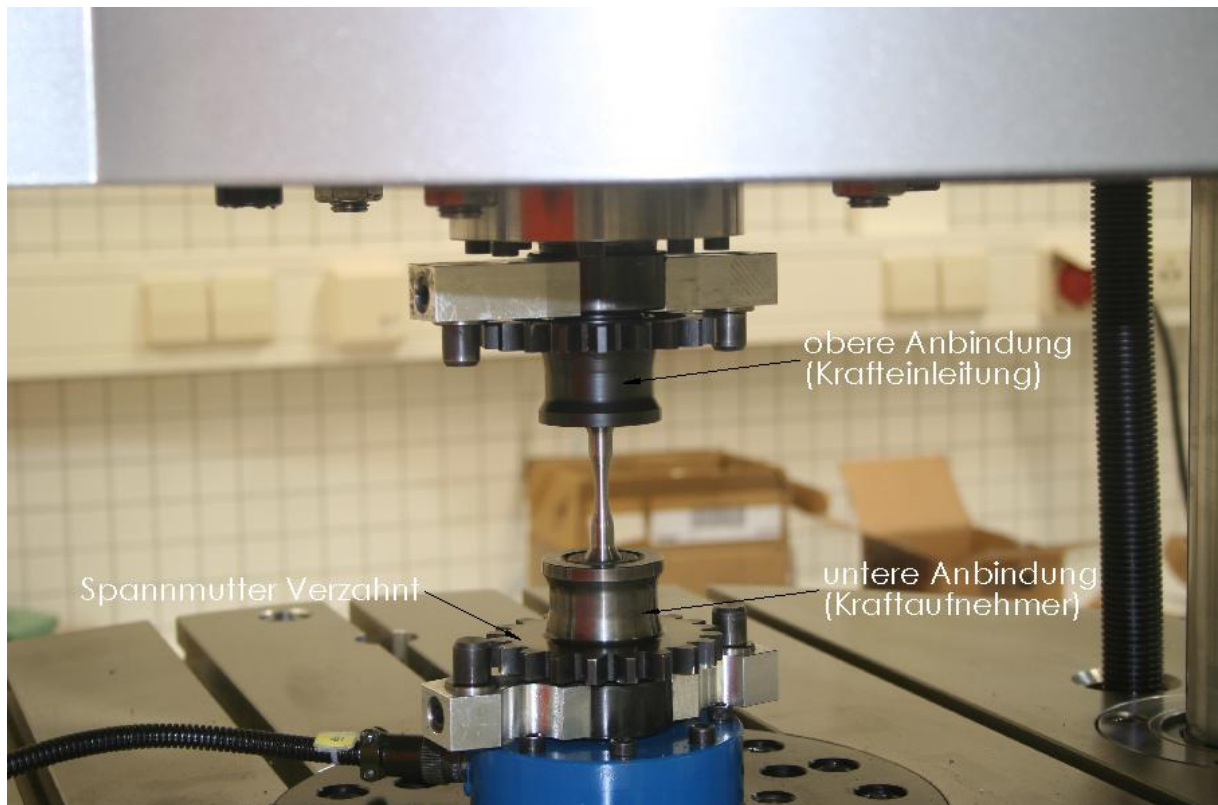


Abbildung 5.4: Maschinenanbindung „POWER SWING NewLine MAG 20kN“

Diesen Nachteil besitzt die dritte Variante nicht, da bei ihr die Grundplatte der Festeinspannung direkt mit der Kraftmessdose verschraubt ist. Bei diesem konstruktiven Entwurf werden zur Maschinenanbindung Gewindezapfen mit dem Durchmesser M22x1.0 benutzt, welche zu den vorhandenen Adaptern der beiden Resonanzprüfstände passen. Diese Tatsache erleichtert das Umrüsten und steigert zudem die Vielseitigkeit der Spannvorrichtung. Die beiden Grundplatten (Krafteinleitung und Festeinspannung) sowie die beiden Spannplatten weisen zur Aufnahme der Spannadapter (Spannschalen) einen Radius des Maßes 25H7 auf, um den Spannadaptern (Aussenradius 25g6) einen präzisen Sitz ohne klemmen zu ermöglichen. Die Spannkraft wird jeweils mittels vier Innensechskantschrauben M8 auf die Proben aufgebracht. Es ist auch möglich mittels dieser vier

Gewindebohrungen später andere Spannmittel an den Grundplatten zu befestigen. Für zylindrische Biegeproben können für jeden Aussendurchmesser bis ca. 46mm Spannadapter mit überschaubarem Fertigungsaufwand hergestellt werden. (Tabelle 5.2) stellt einen Variantenvergleich der drei Konstruktiven Entwürfe dar.

Tabelle 5.2: Variantenvergleich

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Fertigungsaufwand	hoch	mittel	mittel
Vielseitigkeit	niedrig	mittel	hoch
Maschinenkompatibilität	niedrig	niedrig	hoch

Am Ende der Entwürfe entschied ich mich für die dritte Variante, da diese entscheidende Vorteile mit sich bringt:

- passend zu „POWER SWING NewLine MAG 20kN“ und „POWER SWING NewLine MOT 150kN“
- vergleichsweise geringer Fertigungsaufwand, mit den vorhandenen Mitteln fertigbar
- vergleichsweise wenige Einzelteile
- einfache Anbindung an die Prüfstände, vorhandene Kraftmessdosen werden benutzt
- platzsparende und leichteste Variante

5.2 Konstruktion

Die Einspannvorrichtung besteht aus zwei grundsätzlichen Komponenten, zum Einen aus der Spannvorrichtung auf Seiten der Krafteinleitung und zum Anderen aus der Spannvorrichtung, die die Festeinspannung der Proben realisiert. Um optimale Ergebnisse zu erzielen, existieren für die beiden Probendimensionen jeweils ein Satz zylindrischer Spannschalen, die einen Aussendurchmesser von 50mm und jeweils einen den Probendurchmessern angepassten Innendurchmesser aufweisen. Auf der Seite der Kraftmessdose, also auf der fest eingespannten Seite befindet sich eine massive Grundplatte, welche über einen Gewindezapfen unter Nutzung der vorhandenen, verzahnten Spannmutter an die Maschine angebunden wird (Zeichnung Nr. 1012-11). Zur Herstellung der Spannvorrichtung der Grundplatte werden die Teile 1012-11 und 1012-13 nicht einzeln sondern aus dem Grundkörper gefertigt. Nach ausfräsen der grundlegenden Form wird an der Stelle, an der später die Probe gespannt ist, die Bohrung mit dem Maß 50H7 eingebracht. Anschließend wird die obere Hälfte genau in der Mitte der Bohrung horizontal abgeschnitten und die so entstandenen Teile können weiterbearbeitet werden. Auf der Seite der Krafteinleitung ist konstruktiv ebenfalls eine Grundplatte vorgesehen, die über zwei Gelenke mit dem Anschlussstück verbunden ist. Der 25mm Radius wird hier ebenso wie auf der anderen Seite gefertigt. Das Anschlussstück verfügt über eine Gewindebohrung M22x1.0, in welche der Gewindezapfen (Zeichnungsnummer 1012-01) zur Krafteinleitung eingeschraubt wird. Dieser wird wiederum im Erreger der Maschine mittels der verzahnten Spannmutter (Maschinenzubehör) verschraubt. Das Doppelgelenk, das durch eine Koppel verbunden ist, dient dem Zweck, Kräfte, die quer zur Prüfkraft auftreten, resultierend aus der Verschiebung des Kraftangriffspunktes in Längsrichtung der Biegewechselprobe zu minimieren. Dies geschieht dadurch, dass die Koppel einen Winkel gegenüber der Erregerkraftachse einnimmt, welcher aber sehr klein ist. Als Querkraft stellt sich dann abhängig von diesem Winkel lediglich der Sinusanteil der Erregerkraft ein, der bei den vorhandenen minimalen Auslenkungen gegen Null geht. Um eine wirklich feste Einspannung zu gewährleisten, wird das Spannen der Proben auf beiden Seiten durch vier Innensechskantschrauben M8 realisiert. Die Einspannung auf Seiten der Krafteinleitung muss so massiv ausgeführt sein, da die Prüfkraft sinusförmig mit großer Amplitude wirkt und bei Kraftwirkung nach oben („POWER SWING NewLine

MAG 20kN“) bzw. nach unten („POWER SWING NewLine MOT 150kN“) ein Abheben der Spannplatte vermieden werden soll. Die Anbindung an den Kraftaufnehmer der Maschine erfolgt ebenfalls über einen Gewindebolzen M22x1.0, der allerdings auf der Seite der Grundplatte das Gewinde M22x1.5 aufweist, da Nutmuttern nach DIN 1804, wie hier eine zur Verschraubung der Grundplatte mit dem Gewindezapfen verwendet wird, nur mit Feingewinde M22x1.5 erhältlich sind. Das Doppelgelenk wird konstruktiv durch zwei Bolzen (Durchmesser 15g6, Zeichn. Nr. 1012-03), die sowohl in der Koppel als auch in der Maschinenanbindung und der Grundplatte in Bohrungen (Durchmesser 15H7) sitzen, ausgeführt. Diese Passung soll einen möglichst spielfreien Sitz gewährleisten. Die Spannschalen werden aus dem allgemeinen Baustahl S235JR gefertigt, da an sie keine hohen Anforderungen gestellt werden und dieser Werkstoff als Stangenmaterial mit kreisrundem Querschnitt leicht zu beschaffen ist. Als Werkstoff für die Bolzen wählte ich den Einsatzstahl C15E um übermäßigem Verschleiss vorzubeugen. Als Werkstoff für die Spannvorrichtung wählte ich den Vergütungsstahl 34CrMo4, da dieser für diese relativ hochbeanspruchte Anwendung eine gute Kombination von Festigkeit/Dauerfestigkeit, Zähigkeit und Verschleissfestigkeit aufweist.

Tabelle 5.3: Eigenschaften von 34CrMo4 (aus Tab. 5.1.4 FKM-Richtlinie)

Werkstoffnr.	$R_{m,N}$ [MPa]	$R_{e,N}$ [MPa]	$\sigma_{W,zd,N}$ [MPa]	$\sigma_{W,b,N}$ [MPa]	$T_{w,s,N}$ [MPa]
1.7220	1000	800	450	480	260

Die detaillierten Übersichts- Baugruppen- und Einzelteilzeichnungen finden sich im Anhang. Beim Spannen der Proben ist zu beachten, dass die ebene Fläche des Absatzes der „kleinen“ Proben ($D_{\text{nenn}}=25\text{mm}$) an der Vorderseite der Spannplatte bündig mit dieser sind. Die „großen“ Proben ($D_{\text{nenn}}=30\text{mm}$) müssen plan mit der Hinterseite der Spannplatte sein. Das gewährleistet, dass die Prüfkraft immer in der Mitte des zur Krafteinleitung bestimmten Durchmessers angreift und die Hebelarme den definierten Maßen entsprechen (67,65mm für die kleinen und 81mm für die großen Proben).

5.3 Festigkeitsberechnung der Einspannvorrichtung

Um ein dauerhaftes Standhalten der Konstruktion zu gewährleisten soll an dieser Stelle ein Festigkeitsnachweis für die Spannvorrichtung nach Maßgaben der FKM-Richtlinie erfolgen. Dieser Festigkeitsnachweis wird zum Einen an drei Querschnitten der Grundplatte auf Seiten der Festeinspannung und zum Anderen für die Verbindungsbolzen und die Koppel auf Seiten der Krafteinleitung geführt. Zur Ermittlung der wirkenden Kräfte und Momente muss die Konstruktion zuerst in ein mechanisches Ersatzmodell überführt werden.

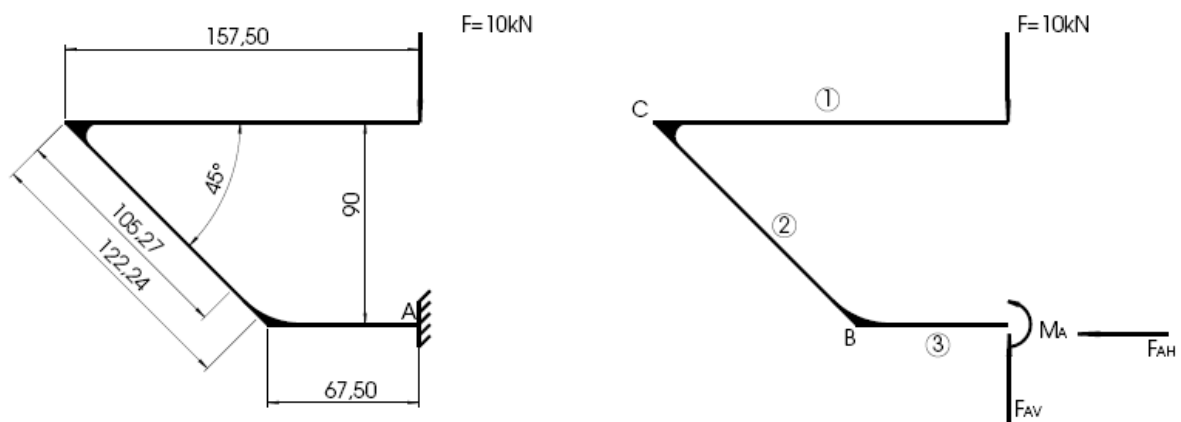


Abbildung 5.5: Mechanisches Ersatzmodell der Grundplatte

Als Prüfkraft wird hier zunächst die maximale Kraftamplitude des vorhandenen Resonanzprüfstandes "POWER SWING NewLine MAG 20kN" von 10kN angesetzt. Über die so erhaltenen zyklischen Auslastungsgrade lässt sich dann die Obergrenze der dauerhaft ertragbaren Prüfkraft ermitteln. Die Verschraubung mit der Kraftmeßdose ist als Einspannung realisiert. So ergeben sich als Lagerreaktionen infolge der Vertikalen Prüflast eine vertikale Lagerkraft, die der Prüfkraft entspricht. Das Einspannmoment M_A sowie die horizontale Lagerkraft F_{AH} haben durch das Fluchten von Prüfkraft und Befestigung die Werte 0. Um nun die Bauteilbelastung an den entsprechenden Querschnitten zu ermitteln werden im gesamten System die Schnittreaktionen ermittelt (Abbildung 5.6). Anhand der so erhaltenen Schnittkräfte und Schnittmomente lassen sich die Kraft und Momentenverläufe im gesamten Ersatzmodell darstellen (Abbildung 5.7). Die detaillierten Berechnungen dazu sind im Anhang zu finden. Infolge der Beanspruchungen werden nun die Nennspannungen

an den entsprechenden Querschnitten errechnet. Die zu untersuchenden Stellen sind in Abbildung 5.8 dargestellt. Die Geometrie der drei Querschnitte ist in Abbildung 5.9 dargestellt.

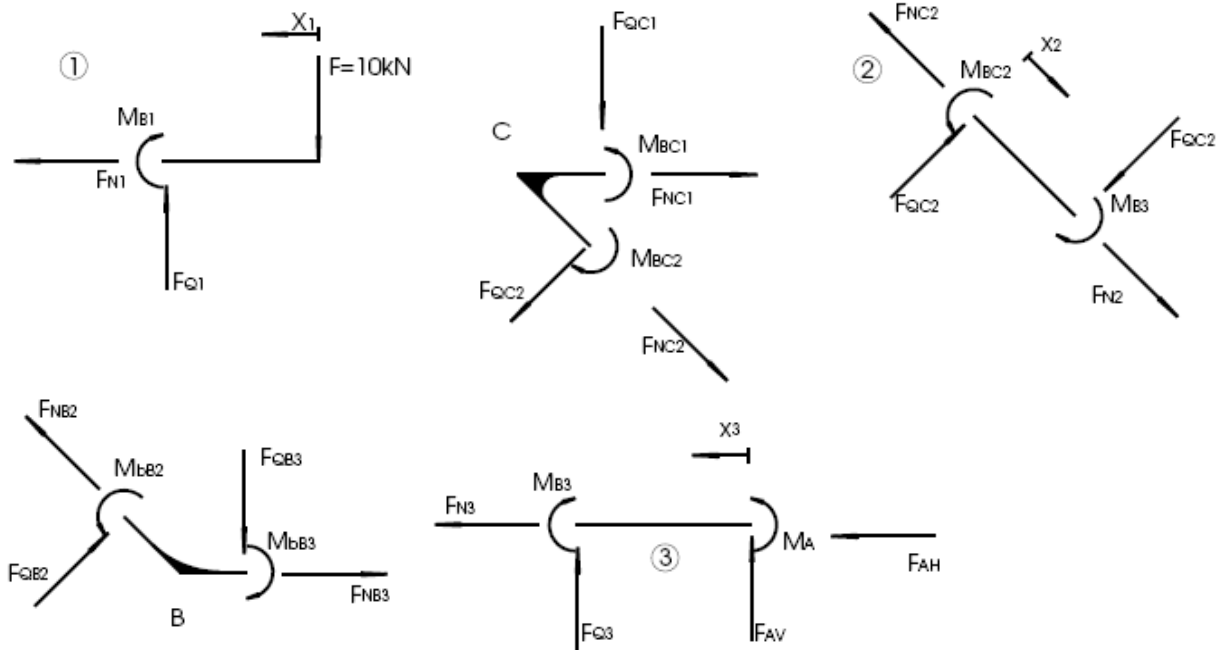


Abbildung 5.6: Schnittreaktionen

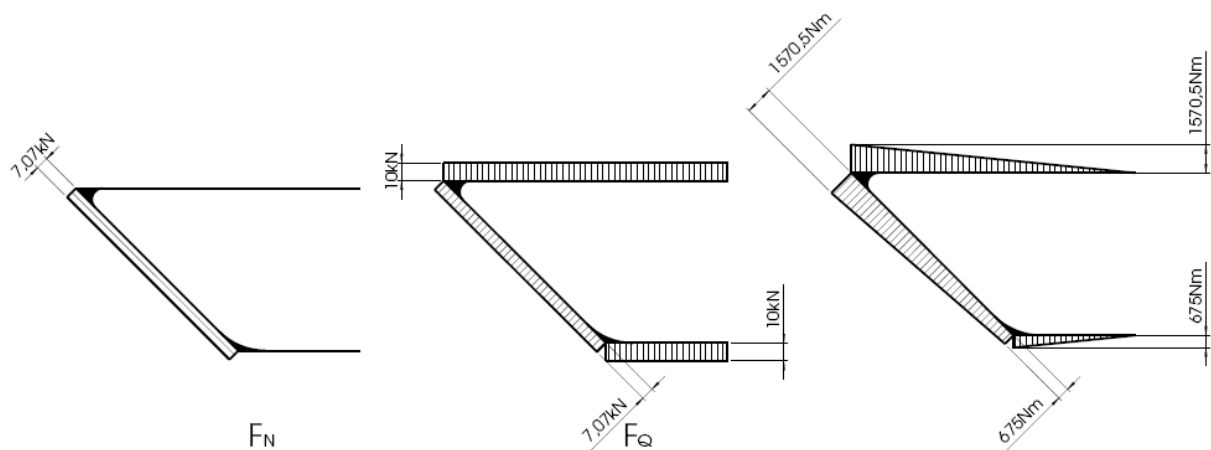


Abbildung 5.7: Lastverläufe

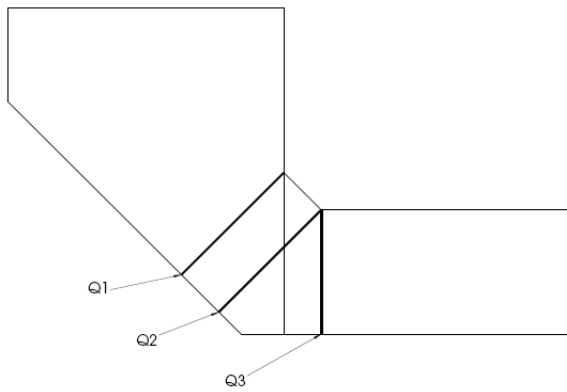


Abbildung 5.8: Betrachtete Querschnitte

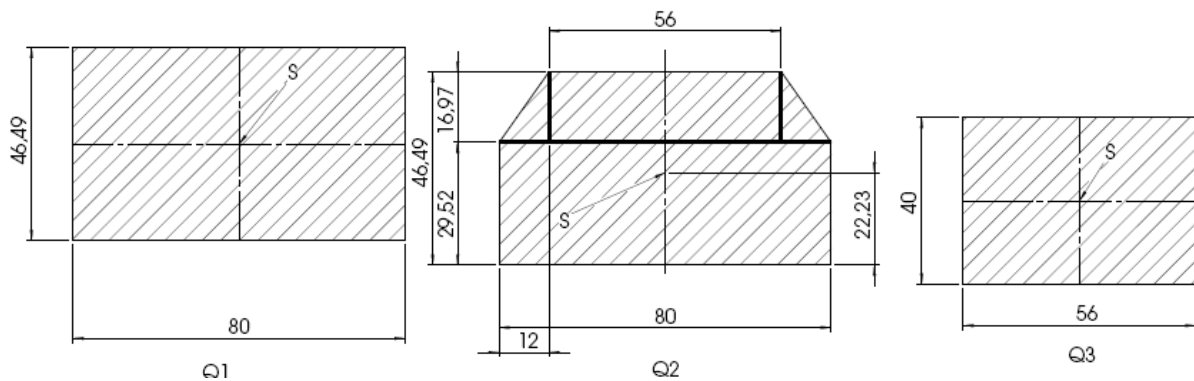


Abbildung 5.9: Geometrie der Querschnitte

Nach dem Bestimmen der Querschnittskennwerte (Tabelle 5.4) können anhand der Lastverläufe die Nennspannungen für die drei Querschnitte bei einer Prüflast von +10kN ermittelt werden (Tabelle 5.4). Die Schubspannung infolge der Biegung wird

für alle drei Querschnitte mit $\tau_s = \frac{3 F_Q}{2 A}$ berechnet. Obwohl diese Gleichung nur für Rechteckquerschnitte gilt, kann man sie auch für Q2 mit hinreichender Genauigkeit anwenden.

Tabelle 5.4: Querschnittskennwerte; Nennspannungen

Querschnitt	Fläche A [mm ²]	Widerstands- moment M _b [mm ³]	Biege- spannung σ _b [MPa]	Schub- spannung τ _s [MPa]	Normal- spannung σ _{zd} [MPa]
Q1	3,72*10 ³	2,88*10 ⁴	28,8	2,9	1,9
Q2	3,52*10 ³	2,39*10 ⁴	29,8	3,2	2,11
Q3	2,24*10 ³	1,45*10 ⁴	45,2	6,7	0

Nach Ermittlung des technologischen Größeneinflusses auf die Normwerte der Zugfestigkeit und der Proportionalitätsgrenze erhält man die Bauteilnormwerte für die gegebenen Dimensionen. Anschließend werden aus diesen mittels des Zugdruckwechselfestigkeitsfaktors und des Schubwechselfestigkeitsfaktors die Bauteilnormwerte für die Zugdruckwechselfestigkeit und die Schubwechselfestigkeit berechnet (Tabelle 5.5). Aufgrund der geringen Differenz der Bauteilnormwerte wird der Nachweis mit den Werten für Q1 geführt, da diese etwas kleiner sind und der Nachweis daher für Q3 konservative Werte liefert. Um die Kerbwirkung des Überganges der 45° Schräge zu erfassen bietet die FKM-Richtlinie für Rechteckquerschnitte eine Überlagerung eines Wellenabsatzes und eines konischen Querschnittsüberganges an. Die Kerbwirkungszahlen für Biegung, Zug/Druckspannung und Schub, sowie die daraus resultierenden Kerbwirkungszahlen für die Schräge zeigt Tabelle 5.6.

Tabelle 5.5: Technolog. Größeneinflussfaktor; Bauteilnormwerte

Querschnitt	Technolog. Größeneinfluss- faktor K _{dm}	Zugfestigkeit R _m [MPa]	Zugdruck- wechselfestigkeit σ _{Wzd} [MPa]	Schub- wechselfestigkeit τ _{Ws} [MPa]
Q1	0,86	858,95	386,53	223,03
Q2	0,86	858,95	386,53	223,03
Q3	0,88	884	386,53	223,03

Tabelle 5.6: Kerbwirkungszahlen Q1 und Q2

Kerbwirkungszahl	Wert
K_{fb} Absatz/Biegung	0,931
K_{fzd} Absatz/Zugdruck	2,06
K_{fs} Absatz/Schub	1,2
K_{fbw} Schräge/Biegung	1
K_{fzdw} Schräge/Zugdruck	2,1
K_{fsw} Schräge/Schub	1,15

Die Querschnitte Q1 und Q2 weisen eine ähnliche Kerbform auf, nämlich einen 45° Knick mit einem Kerbradius von 2,5mm. Bei Q1 geht die Breite b vom Maß 46,5mm prinzipiell zu einem wesentlich größeren Wert über. Zur Berücksichtigung der Kerbwirkung zog ich allerdings ein Maß D (größerer Durchmesser bei Wellenabsätzen) von 60mm heran, da ab diesem Abstand keine Wirkung des Querschnittsüberganges mehr zu erwarten ist. Das selbe Maß ergibt sich bei Q2 konstruktiv. Prinzipiell gilt das auch für Q3 mit dem Unterschied, dass hier der Querschnitt von ca. 53mm auf 40mm reduziert wird. Das bedeutet, das Maß t (Kerbtiefe) beträgt weiterhin ca. 13mm. Für Q3 ergeben sich damit Kerbwirkungszahlen entsprechend Tabelle 5.7. Nach Ermittlung der Bauteilnormwerte, des Kerbeinflusses und der Nennspannungen können die zyklischen Auslastungsgrade der betreffenden Querschnitte bestimmt werden, sowohl für die einzelnen Spannungen als auch für die Vergleichsspannung (Tabelle 5.8). Es ist ersichtlich, dass am kleinsten Querschnitt erwartungsgemäß der größte zyklische Auslastungsgrad vorliegt. Nach den Berechnungen der Grundplatte ist erkennbar, dass die Spannvorrichtung durchaus auch auf dem Resonanzprüfstand "POWER SWING NewLine MOT 150kN" verwendet werden kann und sich bei Kraftamplituden von ca. 40kN noch dauerhaft verhält (bei einer Gesamtsicherheit von $j_{ges}=1,5$).

Tabelle 5.7: Kerbwirkungszahlen für Q3

Kerbwirkungszahl	Wert
K_{fb} Absatz/Biegung	0,837
K_{fzd} Absatz/Zugdruck	1,937
K_{fs} Absatz/Schub	1,169
K_{fbw} Schräge/Biegung	1,0
K_{fzdw} Schräge/Zugdruck	2,0
K_{fsw} Schräge/Schub	1,2

Tabelle 5.8: Auslastungsgrade für Q1, Q2 und Q3

Auslastungsgrade	Q1	Q2	Q3
a_{BKb} für Biegung	0,015	0,015	0
a_{BKzd} für Zug/Druck	0,149	0,016	0,233
a_{BKs} für Schub	0,024	0,026	0,062
a_{BKsv} Vergleichsspannung	0,165	0,171	0,241

Des weiteren muss die Dauerhaltbarkeit der Krafteinleitung gewährleistet sein. Diese wird über die zwei Bolzen und die Koppel realisiert. Die beiden Bolzen werden nur durch eine Scherbelastung beansprucht, welche sich gleichmäßig auf zwei Scherflächen verteilt. Das reduziert die Berechnung auf diese eine Spannungskomponente. So ergibt sich für die Bolzen bei einer Last von $\pm 10\text{kN}$ ein Auslastungsgrad von $a_{BKs}=0,23$. Damit bewegt er sich in ähnlichen Dimensionen wie die Grundplatte. Auch wird die Flächenpressung in den Bolzenführungen betrachtet. Diese beträgt bei der Last von 10kN ca. 45MPa und bleibt damit weit unter der Grenzflächenpressung von 870MPa und beträgt bei einem Sicherheitsfaktor von 1,5 ca. 8% von dieser.

Der Festigkeitsnachweis für die Koppel wird gemäß dem Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen nach Kapitel 4 der FKM-Richtlinie durchgeführt. Das erweist sich als sinnvoll, da die Geometrie der Koppel recht einfach im FEM System nachmodelliert werden kann. Ausserdem erweisen sich die Tabellenwerte für die Formzahl einer Platte mit mittiger Bohrung als unzureichend. So kann der Kerbeinfluss mit einer linearelastischen Spannungsanalyse wesentlich genauer berücksichtigt werden. Dazu wurde eine

Hälfte der Koppel als dreidimensionales Modell ausgeführt und mittels quaderförmiger Elemente, teils als „mapped mesh“ und teils als „free mesh“ vernetzt (Abbildung 5.10). Die Kraft wird im FE Modell wie auch in der Realität in der Lochleibung der Bohrung eingeleitet und beträgt wie bei den anderen Festigkeitsberechnungen auch 10kN. Als maßgebliche Spannung wird die Zugspannung in Richtung der Prüfkraft herangezogen. Im FE Modell ist dies die Spannung in y-Richtung des Ausgangskoordinatensystems. Diese wird entlang eines Pfades, quer zur Belastungsrichtung, vom Rand des Loches in Richtung Bauteilkante (Abbildung 5.11) ausgelesen. Die Spannungen entlang dieses Pfades sind in Abbildung 5.12 dargestellt.

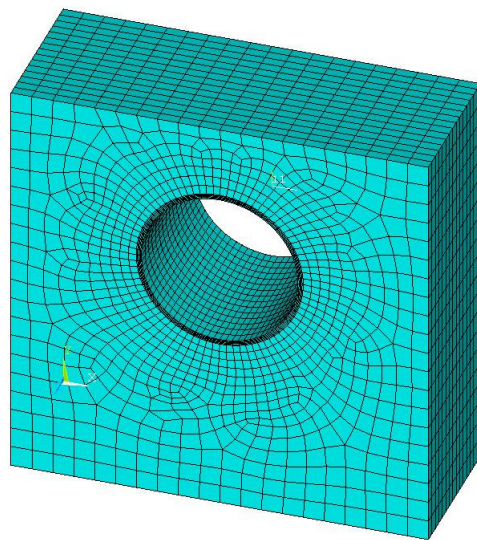


Abbildung 5.10: 3-D Modell der oberen Koppelhälfte

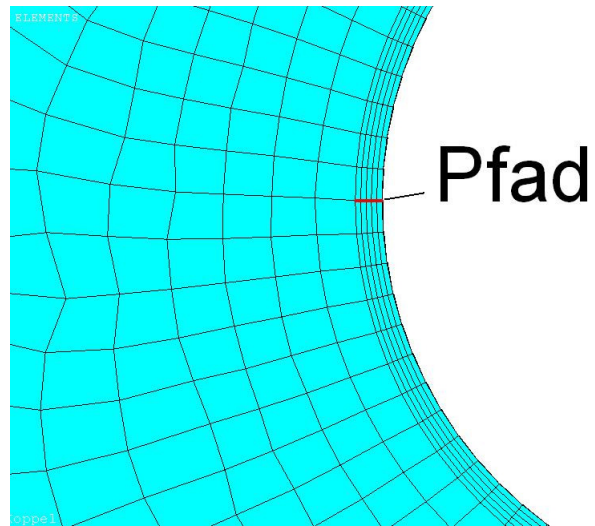


Abbildung 5.11: Pfad für Spannungsgradienten

ZUGSP

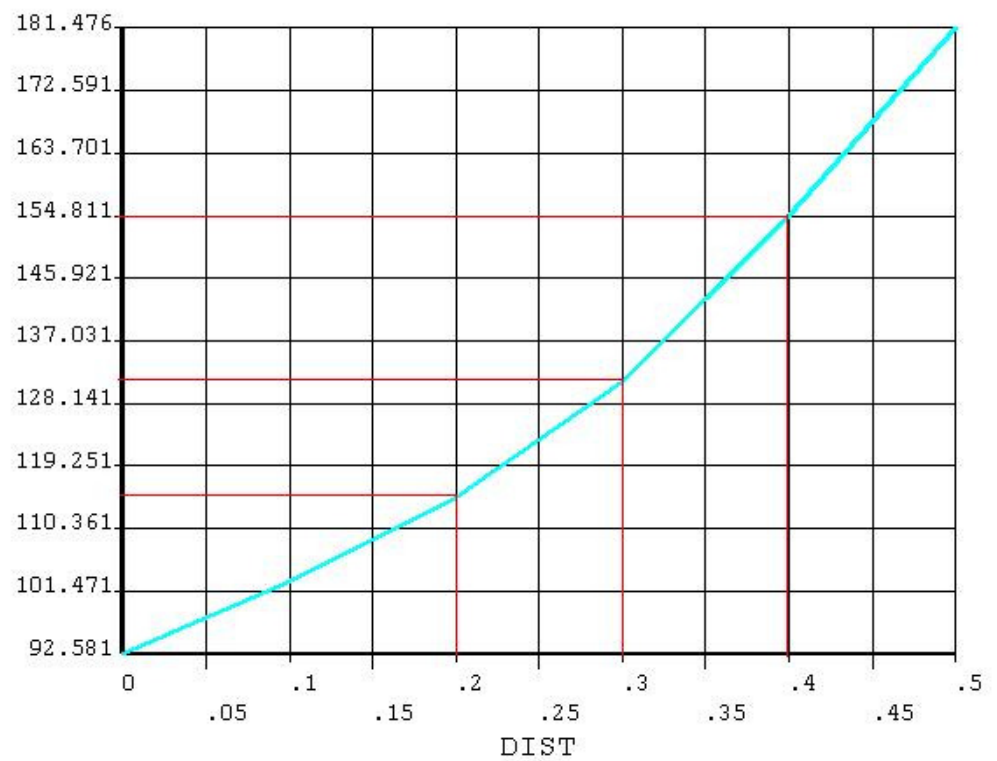


Abbildung 5.12: Spannungsgradient der Koppel entlang des Pfades

Damit ergeben die in Tabelle 5.9 dargestellten Spannungsamplituden.

Tabelle 5.9: Bezogenes Spannungsgefälle und plastische Stützzahl für die Koppel

Δs [mm]	$\sigma_{y,1}$ [MPa]	$\sigma_{y,2}$ [MPa]	G_σ [1/mm]	n_σ
0,1	181,48	154,87	1,466	1,151
0,2	181,48	131,08	1,389	1,148
0,3	181,48	114,79	1,225	1,144

Als Rauheit für die Bohrung wird ein Wert von $R_z=4\mu\text{m}$ herangezogen. Mit der plastischen Stützzahl und dem Rauheitsfaktor lässt sich der Konstruktionsfaktor $K_{WK\sigma}$ berechnen, welcher für die Koppel einen Wert von $K_{WK\sigma}=0,995$ annimmt. Damit ergibt sich gemäß der FKM-Richtlinie eine Bauteilwechselfestigkeit von $\sigma_{WK}=444,43\text{MPa}$. Da jedoch die Belastung im betrachteten Bereich rein schwellend ist ($R_\sigma=0$), muss zur Ermittlung der zyklischen Auslastung die Mittelspannungsempfindlichkeit des Werkstoffes beachtet werden. Entsprechend dem Nachweis beträgt der zyklische Auslastungsgrad für die Koppel $a_{BK\sigma}=0,673$. Das bedeutet, dass in der gesamten Konstruktion die Koppel das höchstbelastete Bauteil darstellt. Es ist allerdings möglich, die Konstruktion auch längere Zeit über einem Auslastungsgrad von 1 (für die Koppel) zu Betreiben, da dieser in diesem Fall ausschließlich für die Bauteildauerschwellfestigkeit gilt. Sollte die Spannvorrichtung über längere Zeit mit höheren Lasten betrieben werden, besteht die Gefahr eines Anrisses in der Lochleibung der Koppel. Das ist allerdings in Verbindung mit dem geringen Fertigungsaufwand für dieses einfache Bauteil hinnehmbar.

6 Erstellen des Versuchsplanes für Wöhlerversuche

6.1 Allgemeines

Die Versuche dienen zur Ermittlung von Kennwerten für das mechanische Verhalten der beiden Probengrößen aus den beiden Werkstoffen EN-GJS-800-8 und EN-GJS-1000-5 bei wechselnder Beanspruchung. Maßgeblich soll bei diesen Versuchen der Einfluss der Festwalzparameter auf die Biegewechselfestigkeit bei einer definierten Kerbform untersucht werden. Die Versuche werden für eine rein wechselnde Biegebeanspruchung durchgeführt, d.h. für ein Spannungsverhältnis von $R_b=-1$ (dementsprechend mit einer Mittelspannung von $S_{mb}=0$). Das Ziel ist es, abhängig von den Festwalzparametern und der Probengröße, die Grenzspannungsamplitude S_{AKb} für eine Schwingspielzahl von $N=2 \cdot 10^6$ Schwingspielen zu ermitteln. Bei der Herstellung der Proben ist darauf zu achten, dass im Bereich der Umlaufkerbe mit geringer, von Bearbeitungsstufe zu Bearbeitungsstufe fallender Spandicke gearbeitet wird und die Rauheitswerte entsprechend den Zeichnungen eingehalten werden. Ausserdem müssen die Oberflächen nach dem Vergüten vor Korrosion geschützt werden. Unerwünschte Zusatzbeanspruchungen müssen beim Einspannen und prüfen der Proben vermieden werden. Das ist auf den vorhandenen Resonanzprüfständen ohne weiteres möglich, indem man bei eingespannter Probe die Traverse mittels feiner Bewegungen in eine Stellung bringt, in der der Kraftaufnehmer in etwa die Gewichtskraft der Festeinspannung anzeigt. Falls eine Probe infolge von Werkstoff oder Bearbeitungsfehlern vorzeitig bricht, ist der zugehörige Wert als unzuverlässig zu kennzeichnen.

6.2 Wöhlerversuch

Um statistisch belegbare Werte für die Dauerschwingfestigkeit zu erhalten werden Dauerschwingversuche nach dem Treppenstufenverfahren durchgeführt. Mit dieser Methode erhält man die mittlere Schwingfestigkeit ($P_0=50\%$) und die Standardabweichung dieses Wertes bei einer vorgegebenen Grenzschningspielzahl (in diesem Fall $N=2 \cdot 10^6$). Dafür muss zunächst die kritische Spannungsamplitude abgeschätzt werden, was in Kapitel 4 mittels verschiedener Festigkeitsberechnungen geschehen ist. Da bislang keine zuverlässigen Werte für den Einflussfaktor der Oberflächenverfestigung in Abhängigkeit von den Festwalzparametern für diesen

speziellen Fall existieren, wird die kritische Spannungsamplitude vorerst für die beiden Probennenngrößen und die beiden Werkstoffe geschätzt. Mit diesen Amplituden werden nun die ersten Proben belastet. Da die beiden vorhandenen Resonanzprüfstände als Prüfkriterium Kräfte nutzen, werden auch die Treppenstufenversuche anhand der eingeleiteten Kräfte durchgeführt. Von diesen kann dann auf die vorhandene Nennspannung bzw. die vorhandene örtliche Spannung zurückgerechnet werden. In Tabelle 6.4 sind nun die Startparameter für die Treppenstufenversuche aufgeführt. Die Spannungen wurden dabei entsprechend den Berechnungen im Anhang aus den Kräften berechnet. Für die Nennbiegespannungen (S_{ab}) entsprechend der Biegetheorie und für die örtlichen Kerbspannungsamplituden (σ_a) als Interpolation aus der Finite-Elemente-Analyse.

Als Startpunkt für die Treppenstufenversuche wurden jeweils die mittels Nennspannungen ermittelten Dauerfestigkeitswerte herangezogen.

Zur Durchführung der Versuche werden jeweils 10 hinsichtlich Werkstoff, Gestaltung und Bearbeitung völlig gleiche Proben herangezogen. Dies bedeutet, dass für alle 20 Fälle jeweils 10 Proben gefertigt werden müssen. Um Reserve bei eventuellen Werkstoff- oder Bearbeitungsfehlern zu haben sollten pro Fall 12 Proben gefertigt werden. Dies bedeutet einen Gesamtumfang von 240 Proben. Diese werden zweckmäßig gestaffelten Schwingbeanspruchungen unterzogen und die zugehörigen Bruch-Schwingspielzahlen festgestellt. Die Staffelung erfolgt in äquidistanten Spannungshorizonten der Spannungsstufenhöhe $\Delta S=15\text{MPa}$. Die für eine Probe zu Versuchsbeginn eingestellte Beanspruchung wird während der Prüfung nicht verändert. Im vorliegenden Fall wird der Spannungsausschlag (die Prüfkraft) konstant gehalten. Proben, die die festgelegte Schwingspielzahl von $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen ohne Bruch erreichen, werden im Versuchsbericht mit [o] gekennzeichnet. Proben, die früher versagen, werden mit [x] gekennzeichnet und die zugehörige Schwingspielzahl aufgenommen. Versagt eine Probe vor Erreichen der Grenzschwingspielzahl, wird die Prüfung für die nächste Probe auf dem nächstkleineren Spannungshorizont durchgeführt. Bei einem „Durchläufer“ entsprechend auf dem nächstgrößeren. Nach Prüfen aller 10 Proben werden die Häufigkeiten der nicht gebrochenen Proben separat für alle Spannungshorizonte aufgenommen. Ein Beispiel zeigt Tabelle 6.1.

Tabelle 6.1: Auswertebeispiel für einen Wöhlerversuch nach dem Treppenstufenverfahren [8]

Spannungs- horizont i	Spannung S _{ab} [MPa]	Prüfkraft [kN]	Folge und Ergebnis der Versuche: x=gebrochen bei N<2*10 ⁶ o=nicht gebrochen bei N=2*10 ⁶									
4	230	6,9										
3	215	6,45		x						x		x
2	200	6	o		x				o		o	
1	185	5,55				x		o				
0	170	5,1					o					
Spannungs- horizont	Aufsummierung:					Häufigkeit der nicht gebrochenen Proben						
i	gebrochen	nicht gebrochen	H _i		i*H _i		i ² *H _i					
4	0	0	0		0		0					
3	3	0	0		0		0					
2	1	3	3		6		12					
1	1	1	1		1		1					
0	0	1	1		0		0					
Summen:	5	5	Σ H _i =5		Σ i*H _i =7		Σ i ² *H _i =13					

Für alle 20 Fälle werden Startwerte abgeschätzt. Aus den so gewonnenen Häufigkeiten lässt sich für die Dauerfestigkeit der Erwartungswert (\bar{S}), sowie die Standardabweichung (s) berechnen. Dies erfolgt mittels folgender Gleichungen:

$$\bar{S} = S_0 + \Delta S * \left(\frac{\sum i * H_i}{\sum H_i} + \frac{1}{2} \right) \quad [8]$$

$$s = 1,62 * \Delta S \left[\frac{\sum H_i * \sum i^2 H_i - (\sum i H_i)^2}{(\sum H_i)^2} + 0,029 \right] \quad [8]$$

So ergibt sich aus obigem Beispiel ein Erwartungswert für die Dauerbiegeseuchselfestigkeit von $\bar{S}=198,5\text{MPa}$ mit einer Standardabweichung von $s=16,26\text{MPa}$. Dieses Verfahren wird in allen 20 Fällen angewendet.

Die oben angegebenen Startparameter sollen für die Proben, die mit einer Festwalzkraft von 6kN behandelt wurden, gelten. Für die mit anderen Kräften bzw. nicht gewalzten Proben werden die Startwerte Tabelle 6.4 entnommen. Zur Ermittlung dieser Startwerte wurden die zu erwartenden Dauerfestigkeitswerte

berechnet, indem der Einflussfaktor für die Oberflächenverfestigung vorerst abgeschätzt wurde (Tabelle 6.3). Es ist davon auszugehen, dass die Biegewechselfestigkeit bis zu einem Punkt mit der Festwalzkraft ansteigt. Bild 6.1 zeigt den Eigenspannungsverlauf der Druckeigenspannungen in Richtung der Biegespannungen in Abhängigkeit vom Randfaserabstand für eine Walzkraft von 12kN wie er mittels einer plastisch-elastischen Finite Elemente Analyse bestimmt wurde.

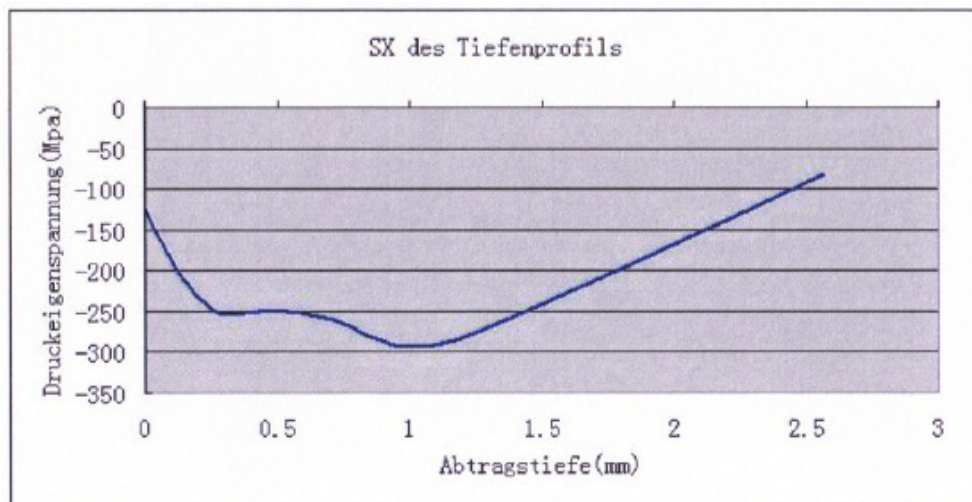


Abbildung 6.1: Druckeigenspannungen bei einer Festwalzkraft von 12kN [7]

Daraus ist ersichtlich, dass, selbst für eine Festwalzkraft von 12kN noch Druckeigenspannungen ausgebildet werden die die Zugspannungen infolge der Biegung in gewissem Maße kompensieren können. Inwieweit das der Realität entspricht muss im Versuch ergründet werden.

Die Ergebnisse für die Biegewechselfestigkeit geben nur den Einfluss einer Änderung der Festwalzkraft wieder. Alle anderen Randbedingungen (Tabelle 6.2) bleiben dabei konstant.

Tabelle 6.2: Randbedingungen für die Wöhlerversuche

	EN-GJS-800-8		EN-GJS-1000-5	
Bedingung	Nenn- durchmesser 25mm	Nenn- durchmesser 30mm	Nenn- durchmesser 25mm	Nenn- durchmesser 30mm
Formzahl für Biegung K_{tb}	2,318	2,213	2,318	2,213
Kerbwirkungs- zahl K_{fb}	1,676	1,669	1,745	1,729
Schmiegun- gs- grad	1	0,96	1	0,96

Tabelle 6.3: geschätzter Einflussfaktor der Oberflächenverfestigung

Festwalzkraft [kN]	Einflussfaktor K_v
nicht festgew.	1
6	1,15
8	1,2
10	1,25
12	1,3

Da die FKM-Richtlinie für gekerbte Bauteile aus Gusseisenwerkstoffen einen Randschichtverfestigungsfaktor von $K_v=1,3$ angibt wurde hier eine erste Abschätzung dieses Faktors in Abhängigkeit von der Festwalzkraft vorgenommen. Inwieweit diese Werte der Realität entsprechen muss die Versuchsauswertung zeigen.

Tabelle 6.4: Startwerte für Dauerschwingversuche

Werkstoff	Nenn- durchmesser [mm]	Festwalzkraft F_w [kN]	Startwert für Prüfkraft [kN]	entsprechende Nennspannung S_b [MPa]
EN-GJS-800-8	25	nicht festgew.	3,15	153,08
		6	3,62	176,05
		8	3,78	183,7
		10	3,94	191,35
		12	4,09	199
	30	nicht festgew.	4,64	153,65
		6	5,33	176,7
		8	5,56	184,39
		10	5,8	192,07
		12	6,03	199,75
EN-GJS-1000-5	25	nicht festgew.	3,75	182,39
		6	4,31	209,74
		8	4,5	218,86
		10	4,69	227,98
		12	4,88	237,1
	30	nicht festgew.	5,55	183,91
		6	6,38	211,5
		8	6,66	220,7
		10	6,94	229,89
		12	7,22	239,09

Tabelle 6.5: Ergebnisse der Wöhlerversuche

Werkstoff	Nenn- durchmesser [mm]	Festwalzkraft F_w [kN]	Biegewechsel- festigkeit S [MPa]	Standard- abweichung s	$K_v(F_w)$
EN-GJS-800-8	25	nicht festgew.			1
		6			
		8			
		10			
		12			
	30	nicht festgew.			1
		6			
		8			
		10			
		12			
EN-GJS-1000-5	25	nicht festgew.			1
		6			
		8			
		10			
		12			
	30	nicht festgew.			1
		6			
		8			
		10			
		12			

Die Ergebnisse für die Dauerfestigkeit können in eine Tabelle entsprechend Tab. 6.5 eingetragen werden. Die Tabellenwerte werden anschließend in eine Grafik eingetragen, die die Abhängigkeit der Biegewechselselfestigkeit von der Festwalzkraft jeweils den entsprechenden Probendurchmessern und Werkstoffen zugeordnet darstellen.

Davon ausgehend, dass für einen einzelnen Fall die Randbedingungen abgesehen von der Festwalzkraft konstant sind, ergibt sich, dass die Bauteilnormwerte der Zugdruckwechselselfestigkeit sowie die Kerbwirkungszahlen und der Rauheitsfaktor ebenfalls konstant sind. Demzufolge lassen sich aus den jeweiligen

Wechselfestigkeitswerten der ungewalzten Proben in Relation zu denen der gewalzten Proben die Werte für K_V berechnen. $K_V(F_W)$ stellt dabei den gesuchten Faktor in Abhängigkeit von der Festwalzkraft F_W dar. Der Bezugswert für die ungewalzten Proben ist mit $K_V=1$ angesetzt. So lässt sich der Einflussfaktor der Oberflächenverfestigung einfach als Verhältnis der Dauerfestigkeitswerte der gewalzten Proben und der der ungewalzten Proben ausdrücken und ebenfalls in Tabelle 6.5 antragen.

$$K_V(F_W) = \frac{\bar{S}(F_W)}{\bar{S}_{\text{ungew}}}$$

Dabei ist zu beachten, dass die Werte für $K_V(F_W)$ für jeden Nenndurchmesser und jeden Werkstoff separat berechnet werden. Es ist zu erwarten, dass sich für den selben Werkstoff unabhängig vom Nenndurchmesser ähnliche Werte für $K_V(F_W)$ einstellen.

7 Zusammenfassung

Die Einspannvorrichtung, die in Kapitel 5 dieser Arbeit entwickelt wurde stellt eine gute Möglichkeit dar die Dauerfestigkeit unter Biegebelastungen für Rundproben zu ermitteln. Sie eignet sich nicht ausschließlich zur Prüfung der beiden behandelten Probengeometrien sondern ebenfalls für andere zylindrische Probenformen mit einem Einspanndurchmesser bis ca. 46 mm. Die Konstruktion ist so ausgelegt, dass auch andere Geometrien durch Anpassung und Montage anderer Spannmittel problemlos geprüft werden können. Bei entsprechend kleinen effektiven Durchmessern können nicht nur die Bauteildauerfestigkeiten sondern sogar komplette Bauteilwöhlerkurven ermittelt werden.

Mittels der in den Wöhlerversuchen gewonnenen Daten lassen sich Rückschlüsse des Einflusses der Festwalzkraft auf die Biegewechselfestigkeit von Rundproben aus zwei unterschiedlichen ADI Werkstoffen ziehen. Auf dieser Grundlage ist es möglich, in Verbindung mit weiteren Versuchen für die Zukunft bereits bei der Konstruktion eines Bauteiles Festlegungen über mögliche Maßnahmen der Oberflächenverfestigung im Bereich kritischer Kerben zu treffen. So wird es in Zukunft möglich sein zyklisch hochbeanspruchte Bauteile, die bisher aufwändig aus Schmiedestählen gefertigt wurden, aus modernen Gusswerkstoffen wie ADI herzustellen. Das Festwalzen stellt eine Möglichkeit dar Gusswerkstoffe wie diese in weiten Bereichen des Maschinenbaus kostengünstig einsetzen zu können. Bislang wird das beispielsweise an Kurbelwellen in Verbrennungsmotoren praktiziert und hat sich viele Male bewährt.

Allerdings gilt es im Hinblick auf eine aussagekräftige Lebensdauerberechnung noch eine Vielzahl weiterer Versuche durchzuführen, die unterschiedlichste Kerbformen und vor allem einen technologischen Größeneinfluss berücksichtigen, welcher sich laut FKM-Richtlinie für Gusseisenwerkstoffe mit Kugelgraphit erst ab einem effektiven Durchmesser von 60 mm einstellt. Ebenso gilt es weiterführend den Mittelspannungseinfluss auf die Dauerfestigkeitswerte zu untersuchen.

V Literatur

- [1] ADI hat das Potenzial, Schmiedestähle zu substituieren Gusseisen verdoppelt seine Festigkeiten.
In: Industrieanzeiger, Konradin Verlag Robert Kohlhammer GmbH - 2003 - Heft 25, S. 38
- [2] Röhrig, Klaus ; Day, Simon: ADI-ein hochwertiger, aber auch anspruchsvoller Gußeisenwerkstoff.
In: Konstruieren und Giessen, Zentrale für Gussverwendung - 1999 - Heft 4, S.17-26
- [3] Kaufmann, Heinz ; Sonsino, C.S. ; Engels, Albrecht: Schwingfestigkeit von randschichtnachbehandelten duktilen Gusseisenwerkstoffen unter konstanten und zufallsartigen Belastungen.
In: Konstruieren und Giessen, Zentrale für Gussverwendung - 1999 - Heft 4, S. 4-16
- [4] Broszeit, E. ; Steindorf, H.: Mechanische Oberflächenbehandlung
Oberursel: DGM Informationsgesellschaft m.b.H, 1989, ISBN 3-88355-156-2
- [5] FKM-Richtlinie Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile,
5., erweiterte Ausgabe (2003)
- [6] DIN 50100 (1978). Dauerschwingversuch: Begriffe, Zeichen, Durchführung, Auswertung
- [7] Zhang, Ru: FEM Simulation des Festwalzprozesses
Hochschule Mittweida (FH) – Fakultät Maschinenbau/Feinwerktechnik
Bachelorarbeit, 2009
- [8] Radaj, Dieter ; Vormwald, Michael: Ermüdungsfestigkeit: Grundlagen für Ingenieure 3. Auflage
Berlin / Heidelberg: Springer Verlag, 1995, 2003, 2007, ISBN 978-3-540-71458-3

VI Anhänge

- 1 Berechnung der Ermüdungsfestigkeit mit Nennspannungen für
 $D_{\text{nenn}}=25\text{mm/EN-GJS-800-8}$
- 7 Berechnung der Ermüdungsfestigkeit mit Nennspannungen für
 $D_{\text{nenn}}=25\text{mm/EN-GJS-1000-5}$
- 13 Berechnung der Ermüdungsfestigkeit mit Nennspannungen für
 $D_{\text{nenn}}=30\text{mm/EN-GJS-800-8}$
- 19 Berechnung der Ermüdungsfestigkeit mit Nennspannungen für
 $D_{\text{nenn}}=30\text{mm/EN-GJS-1000-5}$
- 25 Berechnung der Ermüdungsfestigkeit mit örtlichen Spannungen für
 $D_{\text{nenn}}=25\text{mm/EN-GJS-800-8}$
- 29 Berechnung der Ermüdungsfestigkeit mit örtlichen Spannungen für
 $D_{\text{nenn}}=25\text{mm/EN-GJS-1000-5}$
- 33 Berechnung der Ermüdungsfestigkeit mit örtlichen Spannungen für
 $D_{\text{nenn}}=30\text{mm/EN-GJS-800-8}$
- 37 Berechnung der Ermüdungsfestigkeit mit örtlichen Spannungen für
 $D_{\text{nenn}}=30\text{mm/EN-GJS-1000-5}$
- 41 Festigkeitsnachweis für die Grundplatte
- 53 Festigkeitsnachweis für die Verbindungsbolzen
- 55 Festigkeitsnachweis für die Koppel
- 58 Zeichnungssatz

Beilagen:

Zeichnungssatz im Maßstab 1:1

Berechnung der Ermüdungsfestigkeit mittels Nennspannungen
nach FKM Richtlinie für Nenndurchmesser 25mm und Werkstoff
EN-GJS-800-8

(FKM Richtlinie Kapitel 2)

1. Werkstoffkennwerte

Technologischer Größeneinfluss:

$d_{\text{effNm}} := 60$ d_{effNm} ...Konstante für Gusseisen mit Kugelgraphit

$d := 24.2\text{mm}$ d ...Kerbdurchmesser

$d_{\text{eff}} := d$ d_{eff} ...effektiver Durchmesser

für $d_{\text{eff}} < d_{\text{effNm}}$ $K_{\text{dm}} := 1$ K_{dm} ...technologischer Größeneinflussfaktor

$K_{\text{A}} := 1$ K_{A} ...Anisotropiefaktor

$R_{\text{mN}} := 800\text{MPa}$ R_{mN} ...Normwert der Werkstoffzugfestigkeit

$R_{\text{m}} := K_{\text{dm}} \cdot K_{\text{A}} \cdot R_{\text{mN}} = 800 \cdot \text{MPa}$

$f_{\text{W}\sigma} := 0.34$ $f_{\text{W}\sigma}$...Zugdruckwechselfestigkeitsfaktor (2.2.1)

$\sigma_{\text{Wzd}} := f_{\text{W}\sigma} \cdot R_{\text{m}}$ σ_{Wzd} ...Bauteilwechselfestigkeit

$\sigma_{\text{Wzd}} = 272 \cdot \text{MPa}$

$K_{\text{TD}} := 1$ K_{TD} ...Temperaturfaktor für normale
Temperatur (2.2.3.1)

2. Konstruktionskennwerte

$K_{\text{WKb}} = \left(K_{\text{fb}} + \frac{1}{K_{\text{R}\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_{\text{V}} \cdot K_{\text{S}} \cdot K_{\text{NLE}}}$ K_{WKb} ...Konstruktionsfaktor
für Biegung (2.3.1.1)

$K_{\text{fb}} = \frac{K_{\text{tb}}}{n_{\sigma\text{r}} \cdot n_{\sigma\text{d}}}$

K_{fb} ...Kerbwirkungszahl

K_{tb} ...Formzahl für Biegung

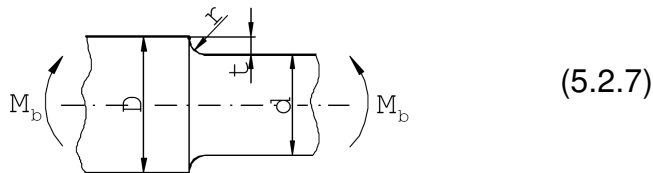
$n_{\sigma\text{r}}$...Stützzahl des Bauteiles für Normalspannung
je nach Kerbradius

$n_{\sigma\text{d}}$...Stützzahl des Bauteiles für Normalspannung
je nach Durchmesser des Teiles

$K_{\text{tb}} = (K_{\text{tU}} - K_{\text{tA}}) \cdot \sqrt{\frac{D_1 - D}{D - d}} + K_{\text{tA}}$

- K_{tU} ...Formzahl für Rundstab mit Umlaufkerbe
 K_{tA} ...Formzahl für Rundstab mit Absatz
 D_1 ...kleinerer Durchmesser des Absatzes
 d ...Durchmesser im Kerbgrund
 D ...größerer Durchmesser des Absatzes

Formzahl für Absatz bei Biegung nach FKM Richtlinie (5.2.5):



$$K_{tA} = 1 + \frac{1}{\sqrt{0.62 \cdot \frac{r}{t} + 11.6 \cdot \frac{r}{d} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{r}{d}\right)^2 + 0.2 \cdot \left(\frac{r}{t}\right)^3 \cdot \frac{d}{D}}}$$

$r := 1.1\text{mm}$

r ...Kerbradius

$D := 35\text{mm}$

D ...größerer Durchmesser des Absatzes

$t := 5\text{mm}$

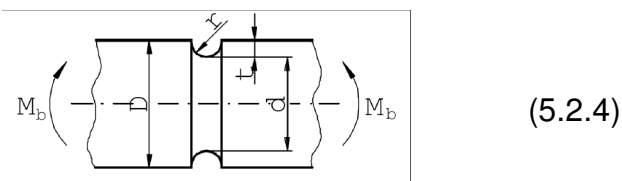
t ...Differenz der Absatzradien

$d := 25\text{mm}$

d ...kleinerer Durchmesser des Absatzes
(Probennendurchmesser)

$$K_{tA} := 1 + \frac{1}{\sqrt{0.62 \cdot \frac{r}{t} + 11.6 \cdot \frac{r}{d} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{r}{d}\right)^2 + 0.2 \cdot \left(\frac{r}{t}\right)^3 \cdot \frac{d}{D}}}$$

$$K_{tA} = 2.161$$



$$K_{tU} := 1 + \frac{1}{\sqrt{0.2 \cdot \frac{r}{t} + 5.5 \cdot \frac{r}{d} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{r}{d}\right)^2}}$$

$$K_{tU} = 2.74$$

Aus den beiden Formzahlen für Absatz und Umlaufkerbe wird nun die Formzahl

für den Absatz mit Freistich berechnet.

$$D_1 := 25\text{mm} \quad r := 1.1\text{mm}$$

$$D := 35\text{mm}$$

$$d := 24.2\text{mm}$$

$$K_{tb} := (K_{tU} - K_{tA}) \cdot \sqrt{\frac{D_1 - d}{D - d}} + K_{tA}$$

$$K_{tb} = 2.318$$

Zur Ermittlung der Stützzahlen für Normalspannung wird das bezogene Spannungsgefälle für eine Welle mit Absatz herangezogen:

$$\frac{t}{d} = 0.207 \quad \text{für } \frac{t}{d} \leq 0.25 \text{ berechnet sich } \phi \text{ wie folgt (2.3.3):}$$

$$\phi := \frac{1}{4 \cdot \sqrt{\frac{t}{r}} + 2} \quad G^{\circ}_{\sigma r} \text{ ...bezogenes Spannungsgefälle infolge der Konstruktion}$$

$$G^{\circ}_{\sigma r} := \frac{2.3}{r} \cdot (1 \cdot \phi) \quad G^{\circ}_{\sigma r} = 0.199 \cdot \frac{1}{\text{mm}}$$

mit diesem bezogenen Spannungsgefälle lässt sich nun die Stützzahl n_{σ} berechnen.

$$\text{für } 0.1 \cdot \frac{1}{\text{mm}} < G^{\circ}_{\sigma r} \leq 1 \frac{1}{\text{mm}} \text{ berechnet sich die Stützzahl wie folgt (2.3.2.1):}$$

$$n_{\sigma r} = 1 + \sqrt{G^{\circ}_{\sigma r} \cdot \text{mm} \cdot 10} - \left(a_G + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}} \right)$$

die Konstanten a_G und b_G für Gusseisen mit Kugelgraphit aus Tab 2.3.3:

$$a_G := 0.05 \quad b_G := 3200$$

$$n_{\sigma r} := 1 + \sqrt{G^{\circ}_{\sigma r} \cdot \text{mm} \cdot 10} - \left(a_G + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}} \right)$$

$$n_{\sigma r} = 1.223$$

$$G^{\circ}_{\sigma d} := \frac{2}{d} \quad G^{\circ}_{\sigma d} \text{ ...bezogenes Spannungsgefälle infolge der Belastung abhängig von } d$$

$$G^{\circ}_{\sigma d} = 0.083 \cdot \frac{1}{\text{mm}}$$

damit berechnet sich die Stützzahl $n_{\sigma d}$ für: $G^{\circ}_{\sigma d} \leq \frac{0.1}{\text{mm}}$

$$\text{mit } n_{\sigma d} := 1 + G^{\circ}_{\sigma d} \cdot \text{mm} \cdot 10^{-\left(a_G - 0.5 + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}}\right)}$$

$$\text{zu } n_{\sigma d} = 1.131$$

die Kerbwirkung in Abhängigkeit von Formzahl und Stützzahlen wird nun in der Kerbwirkungszahl zusammengefasst:

$$K_{fb} := \frac{K_{tb}}{n_{\sigma r} \cdot n_{\sigma d}} \quad K_{fb} = 1.676 \quad (2.3.10)$$

zur Ermittlung des Konstruktionsfaktors werden nun noch folgende Einflüsse berücksichtigt:

- Einfluss der Rauheit
- Einfluss der Oberflächenverfestigung
- Einfluss einer Schutzschicht

$$R_z := 9\mu\text{m} \quad R_z \text{ ...angenommene mittlere Rauheit nach dem Festwalzen der Kerbe}$$

$$K_{R\sigma} = 1 - a_{R\sigma} \cdot \log\left(\frac{R_z}{\mu\text{m}}\right) \cdot \log\left(2 \cdot \frac{R_m}{R_{mN\min}}\right)$$

$$a_{R\sigma} := 0.16 \quad a_{R\sigma} \text{ ...Konstante (Tab 2.3.4)}$$

$$R_{mN\min} := 400\text{MPa} \quad R_{mN\min} \text{ ...Konstante (Tab 2.3.4)}$$

$$K_{R\sigma} := 1 - a_{R\sigma} \cdot \log\left(\frac{R_z}{\mu\text{m}}\right) \cdot \log\left(2 \cdot \frac{R_m}{R_{mN\min}}\right)$$

$$K_{R\sigma} = 0.908 \quad K_{R\sigma} \text{ ...Rauheitsfaktor}$$

Ermittlung des Randschichtfaktors aus Tab 2.3.5 für Eisengusswerkstoff:

$$K_V := \begin{pmatrix} 1 \\ 1.15 \\ 1.2 \\ 1.25 \\ 1.3 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} K_V \text{ für alle 5} \\ \text{Walzzustände} \end{array}$$

Die Faktoren K_S und K_{NLE} gelten nur für Aluminiumwerkstoffe bzw. Grauguss und werden hier laut FKM Richtlinie mit 1 angesetzt.

$$K_S := 1 \quad K_{NLE} := 1$$

Damit berechnet sich der Konstruktionsfaktor wie folgt:

$$K_{WKb} := \left(K_{fb} + \frac{1}{K_{R\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_V \cdot K_S \cdot K_{NLE}}$$

$$K_{WKb} = \begin{pmatrix} 1.777 \\ 1.545 \\ 1.481 \\ 1.421 \\ 1.367 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{Konstruktionsfaktor } K_{WKb} \text{ für alle} \\ \text{5 Walzzustände} \end{array}$$

damit lassen sich nun die Nennwerte der Bauteilwechselfestigkeit S_{WKb} bestimmen:

$$S_{WKb} := \frac{\sigma_{Wzd}}{K_{WKb}}$$

$$S_{WKb} = \begin{pmatrix} 153.083 \\ 176.045 \\ 183.699 \\ 191.353 \\ 199.007 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Folgend werden die Theoretischen Prüfkkräfte berechnet welche bei

gegebener Geometrie diese **Nennspannungen** verursachen:

$$S_{WKb} = \frac{F_p \cdot l}{\left(\frac{\pi \cdot d^3}{32} \right)}$$

F_p ...Prüfkraft zur Erzeugung der Nennspannung unterhalb der sich das Bauteil dauerhaft verhält

$$l := 67.65 \text{ mm}$$

l ...Hebelarm (kleine Proben)

$$F_p := \frac{\pi \cdot d^3 \cdot S_{WKb}}{32 \cdot l}$$

Prüfkraft nach Anwendung von $S = \frac{M_b}{W_b}$

$$F_p = \begin{pmatrix} 3.149 \\ 3.621 \\ 3.778 \\ 3.936 \\ 4.093 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$

mit $W_b = \frac{\pi \cdot d^3}{32}$ und $M_b := F_p \cdot l$ wobei S immer für Nennspannung steht

Die so ermittelten Werte für F_p können als Startwerte für die Treppenstufenversuche der Proben mit dem Nenndurchmesser 25 mm aus dem Werkstoff ADI 800 genutzt werden.

Berechnung der Ermüdungsfestigkeit mittels Nennspannungen
nach FKM Richtlinie für Nenndurchmesser 25mm und Werkstoff
EN-GJS-1000-5

(FKM Richtlinie Kapitel 2)

1. Werkstoffkennwerte

Technologischer Größeneinfluss:

$d_{\text{effNm}} := 60$ d_{effNm} ...Konstante für Gusseisen
mit Kugelgraphit

$d := 24.2\text{mm}$ d ...Kerbdurchmesser

$d_{\text{eff}} := d$ d_{eff} ...effektiver Durchmesser

für $d_{\text{eff}} < d_{\text{effNm}}$ $K_{\text{dm}} := 1$ K_{dm} ...technologischer Größeneinflussfaktor

$K_{\text{A}} := 1$ K_{A} ...Anisotropiefaktor

$R_{\text{mN}} := 1000\text{MPa}$ R_{mN} ...Normwert der Werkstofffestigkeit

$R_{\text{m}} := K_{\text{dm}} \cdot K_{\text{A}} \cdot R_{\text{mN}} = 1000 \cdot \text{MPa}$

$f_{\text{W}\sigma} := 0.34$ $f_{\text{W}\sigma}$...Zugdruckwechselfestigkeitsfaktor (2.2.1)

$\sigma_{\text{Wzd}} := f_{\text{W}\sigma} \cdot R_{\text{m}}$ σ_{Wzd} ...Bauteilwechselfestigkeit

$\sigma_{\text{Wzd}} = 340 \cdot \text{MPa}$

$K_{\text{TD}} := 1$ K_{TD} ...Temperaturfaktor für normale
Temperatur (2.2.3.1)

2. Konstruktionskennwerte

$K_{\text{WKb}} = \left(K_{\text{fb}} + \frac{1}{K_{\text{R}\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_{\text{V}} \cdot K_{\text{S}} \cdot K_{\text{NLE}}}$ K_{WKb} ...Konstruktionsfaktor
für Biegung (2.3.1.1)

$K_{\text{fb}} = \frac{K_{\text{tb}}}{n_{\sigma\text{r}} \cdot n_{\sigma\text{d}}}$

K_{fb} ...Kerbwirkungszahl

K_{tb} ...Formzahl für Biegung

$n_{\sigma\text{r}}$...Stützzahl des Bauteiles für Normalspannung
je nach Kerbradius

$n_{\sigma\text{d}}$...Stützzahl des Bauteiles für Normalspannung
je nach Durchmesser des Teiles

$K_{\text{tb}} = (K_{\text{tU}} - K_{\text{tA}}) \cdot \sqrt{\frac{D_1 - D}{D - d}} + K_{\text{tA}}$

K_{tU} ...Formzahl für Rundstab mit Umlaufkerbe

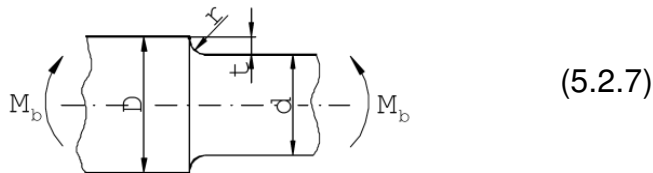
K_{tA} ...Formzahl für Rundstab mit Absatz

D_1 ...kleinerer Durchmesser des Absatzes

d ...Durchmesser im Kerbgrund

D ...größerer Durchmesser des Absatzes

Formzahl für Absatz bei Biegung nach FKM Richtlinie (5.2.5):



$$K_{tA} = 1 + \frac{1}{\sqrt{0.62 \cdot \frac{r}{t} + 11.6 \cdot \frac{r}{d} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{r}{d}\right)^2 + 0.2 \cdot \left(\frac{r}{t}\right)^3 \cdot \frac{d}{D}}}$$

$r := 1.1\text{mm}$

r ...Kerbradius

$D := 35\text{mm}$

D ...größerer Durchmesser des Absatzes

$t := 5\text{mm}$

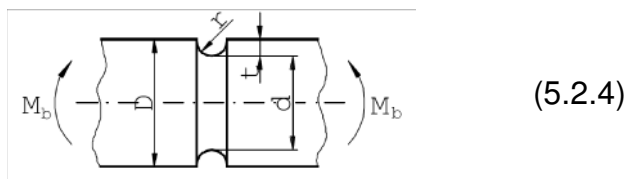
t ...Differenz der Absatzradien

$d := 25\text{mm}$

d ...kleinerer Durchmesser des Absatzes
(Probennendurchmesser)

$$K_{tA} := 1 + \frac{1}{\sqrt{0.62 \cdot \frac{r}{t} + 11.6 \cdot \frac{r}{d} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{r}{d}\right)^2 + 0.2 \cdot \left(\frac{r}{t}\right)^3 \cdot \frac{d}{D}}}$$

$K_{tA} = 2.161$



$$K_{tU} := 1 + \frac{1}{\sqrt{0.2 \cdot \frac{r}{t} + 5.5 \cdot \frac{r}{d} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{r}{d}\right)^2}}$$

$K_{tU} = 2.74$

Aus den beiden Formzahlen für Absatz und Umlaufkerbe wird nun die Formzahl für den Absatz mit Freistich berechnet.

$$D_1 := 25\text{mm} \quad r := 1.1\text{mm}$$

$$D := 35\text{mm}$$

$$d := 24.2\text{mm}$$

$$K_{tb} := (K_{tU} - K_{tA}) \cdot \sqrt{\frac{D_1 - d}{D - d}} + K_{tA}$$

$$K_{tb} = 2.318$$

Zur Ermittlung der Stützzahlen für Normalspannung wird das bezogene Spannungsgefälle für eine Welle mit Absatz herangezogen:

$$\frac{t}{d} = 0.207 \quad \text{für } \frac{t}{d} \leq 0.25 \text{ berechnet sich } \phi \text{ wie folgt (2.3.3):}$$

$$\phi := \frac{1}{4 \cdot \sqrt{\frac{t}{r}} + 2} \quad G^\circ_{\sigma r} \text{ ...bezogenes Spannungsgefälle infolge der Konstruktion}$$

$$G^\circ_{\sigma r} := \frac{2.3}{r} \cdot (1 \cdot \phi) \quad G^\circ_{\sigma r} = 0.199 \cdot \frac{1}{\text{mm}}$$

mit diesem bezogenen Spannungsgefälle lässt sich nun die Stützzahl n_σ berechnen.

$$\text{für } 0.1 \cdot \frac{1}{\text{mm}} < G^\circ_{\sigma r} \leq 1 \frac{1}{\text{mm}} \text{ berechnet sich die Stützzahl wie folgt (2.3.2.1):}$$

$$n_{\sigma r} = 1 + \sqrt{G^\circ_{\sigma r} \cdot \text{mm} \cdot 10} - \left(a_G + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}} \right)$$

die Konstanten a_G und b_G für Gusseisen mit Kugelgraphit aus Tab 2.3.3:

$$a_G := 0.05 \quad b_G := 3200$$

$$n_{\sigma r} := 1 + \sqrt{G^\circ_{\sigma r} \cdot \text{mm} \cdot 10} - \left(a_G + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}} \right)$$

$$n_{\sigma r} = 1.193$$

$$G^{\circ}_{\sigma d} := \frac{2}{d} \quad G^{\circ}_{\sigma d} \text{ ...bezogenes Spannungsgefälle infolge der Belastung abhängig von } d$$

$$G^{\circ}_{\sigma d} = 0.083 \cdot \frac{1}{\text{mm}}$$

damit berechnet sich die Stützzahl $n_{\sigma d}$ für: $G^{\circ}_{\sigma d} \leq \frac{0.1}{\text{mm}}$

$$\text{mit } n_{\sigma d} := 1 + G^{\circ}_{\sigma d} \cdot \text{mm} \cdot 10^{-\left(a_G - 0.5 + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}}\right)}$$

$$\text{zu } n_{\sigma d} = 1.113$$

die Kerbwirkung in Abhängigkeit von Formzahl und Stützzahlen wird nun in der Kerbwirkungszahl zusammengefasst:

$$K_{fb} := \frac{K_{tb}}{n_{\sigma r} \cdot n_{\sigma d}} \quad K_{fb} = 1.745 \quad (2.3.10)$$

zur Ermittlung des Konstruktionsfaktors werden nun noch folgende Einflüsse berücksichtigt:

- Einfluss der Rauheit
- Einfluss der Oberflächenverfestigung
- Einfluss einer Schutzschicht

$$R_z := 9\mu\text{m} \quad R_z \text{ ...angenommene mittlere Rauheit nach dem Festwalzen der Kerbe}$$

$$K_{R\sigma} = 1 - a_{R\sigma} \cdot \log\left(\frac{R_z}{\mu\text{m}}\right) \cdot \log\left(2 \cdot \frac{R_m}{R_{mNmin}}\right)$$

$$a_{R\sigma} := 0.16 \quad a_{R\sigma} \text{ ...Konstante (Tab 2.3.4)}$$

$$R_{mNmin} := 400\text{MPa} \quad R_{mNmin} \text{ ...Konstante (Tab 2.3.4)}$$

$$K_{R\sigma} := 1 - a_{R\sigma} \cdot \log\left(\frac{R_z}{\mu\text{m}}\right) \cdot \log\left(2 \cdot \frac{R_m}{R_{mNmin}}\right)$$

$$K_{R\sigma} = 0.893 \quad K_{R\sigma} \text{ ...Rauhheitsfaktor}$$

Ermittlung des Randschichtfaktors aus Tab 2.3.5 für Eisengusswerkstoff:

$$K_V := \begin{pmatrix} 1 \\ 1.15 \\ 1.2 \\ 1.25 \\ 1.3 \end{pmatrix} \quad K_V \text{ für alle 5 Walzzustände}$$

Die Faktoren K_S und K_{NLE} gelten nur für Aluminiumwerkstoffe bzw. Grauguss und werden hier laut FKM Richtlinie mit 1 angesetzt.

$$K_S := 1 \quad K_{NLE} := 1$$

Damit berechnet sich der Konstruktionsfaktor wie folgt:

$$K_{WKb} := \left(K_{fb} + \frac{1}{K_{R\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_V \cdot K_S \cdot K_{NLE}}$$

$$K_{WKb} = \begin{pmatrix} 1.864 \\ 1.621 \\ 1.553 \\ 1.491 \\ 1.434 \end{pmatrix} \quad \text{Konstruktionsfaktor } K_{WKb} \text{ für alle 5 Walzzustände}$$

damit lassen sich nun die Nennwerte der Bauteilwechselfestigkeit S_{WKb} bestimmen:

$$S_{WKb} := \frac{\sigma_{Wzd}}{K_{WKb}}$$

$$S_{WKb} = \begin{pmatrix} 182.386 \\ 209.744 \\ 218.864 \\ 227.983 \\ 237.102 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Folgend werden die Theoretischen Prüfkraften berechnet welche bei gegebener Geometrie diese **Nennspannungen** verursachen:

$$S_{WKb} = \frac{F_p \cdot l}{\left(\frac{\pi \cdot d^3}{32} \right)} \quad F_p \dots \text{Prüfkraft zur Erzeugung der Nennspannung unterhalb der sich das Bauteil dauerhaft verhält}$$

$l := 67.65\text{mm}$

l...Hebelarm (kleine Proben)

$$F_p := \frac{\pi \cdot d^3 \cdot S_{WKb}}{32 \cdot l}$$

Prüfkraft nach Anwendung von $S = \frac{M_b}{W_b}$

$$F_p = \begin{pmatrix} 3.751 \\ 4.314 \\ 4.501 \\ 4.689 \\ 4.877 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$

mit $W_b = \frac{\pi \cdot d^3}{32}$ und $M_b := F_p \cdot l$ wobei S immer für Nennspannung steht

Die so ermittelten Werte für F_p können als Startwerte für die Treppenstufenversuche der Proben mit dem Nenndurchmesser 25 mm aus dem Werkstoff ADI 1000 genutzt werden.

Berechnung der Ermüdungsfestigkeit mittels Nennspannungen
nach FKM Richtlinie für Nenndurchmesser 30 mm und Werkstoff
EN-GJS-800-8

(FKM Richtlinie Kapitel 2)

1. Werkstoffkennwerte

Technologischer Größeneinfluss:

$d_{\text{effNm}} := 60$ d_{effNm} ...Konstante für Gusseisen
mit Kugelgraphit

$d := 29.2\text{mm}$ d ...Kerbdurchmesser

$d_{\text{eff}} := d$ d_{eff} ...effektiver Durchmesser

für $d_{\text{eff}} < d_{\text{effNm}}$ $K_{\text{dm}} := 1$ K_{dm} ...technologischer Größeneinflussfaktor

$K_{\text{A}} := 1$ K_{A} ...Anisotropiefaktor

$R_{\text{mN}} := 800\text{MPa}$ R_{mN} ...Normwert der Werkstofffestigkeit

$R_{\text{m}} := K_{\text{dm}} \cdot K_{\text{A}} \cdot R_{\text{mN}} = 800 \cdot \text{MPa}$

$f_{\text{W}\sigma} := 0.34$ $f_{\text{W}\sigma}$...Zugdruckwechselfestigkeitsfaktor (2.2.1)

$\sigma_{\text{Wzd}} := f_{\text{W}\sigma} \cdot R_{\text{m}}$ σ_{Wzd} ...Bauteilwechselfestigkeit

$\sigma_{\text{Wzd}} = 272 \cdot \text{MPa}$

$K_{\text{TD}} := 1$ K_{TD} ...Temperaturfaktor für normale
Temperatur (2.2.3.1)

2. Konstruktionskennwerte

$K_{\text{WKb}} = \left(K_{\text{fb}} + \frac{1}{K_{\text{R}\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_{\text{V}} \cdot K_{\text{S}} \cdot K_{\text{NLE}}}$ K_{WKb} ...Konstruktionsfaktor
für Biegung (2.3.1.1)

$$K_{\text{fb}} = \frac{K_{\text{tb}}}{n_{\sigma\text{r}} \cdot n_{\sigma\text{d}}}$$

K_{fb} ...Kerbwirkungszahl

K_{tb} ...Formzahl für Biegung

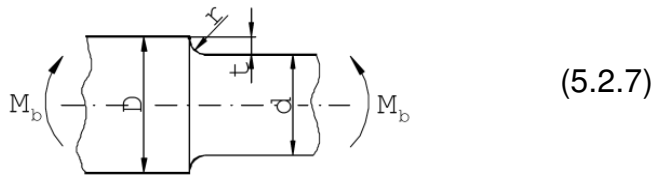
$n_{\sigma\text{r}}$...Stützzahl des Bauteiles für Normalspannung
je nach Kerbradius

$n_{\sigma\text{d}}$...Stützzahl des Bauteiles für Normalspannung
je nach Durchmesser des Teiles

$$K_{\text{tb}} = (K_{\text{tU}} - K_{\text{tA}}) \cdot \sqrt{\frac{D_1 - D}{D - d}} + K_{\text{tA}}$$

- K_{tU} ...Formzahl für Rundstab mit Umlaufkerbe
- K_{tA} ...Formzahl für Rundstab mit Absatz
- D_1 ...kleinerer Durchmesser des Absatzes
- d ...Durchmesser im Kerbgrund
- D ...größerer Durchmesser des Absatzes

Formzahl für Absatz bei Biegung nach FKM Richtlinie (5.2.5):



$$K_{tA} = 1 + \frac{1}{\sqrt{0.62 \cdot \frac{r}{t} + 11.6 \cdot \frac{r}{d} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{r}{d}\right)^2 + 0.2 \cdot \left(\frac{r}{t}\right)^3 \cdot \frac{d}{D}}}$$

$r := 1.5\text{mm}$

r ...Kerbradius

$D := 42\text{mm}$

D ...größerer Durchmesser des Absatzes

$t := 6\text{mm}$

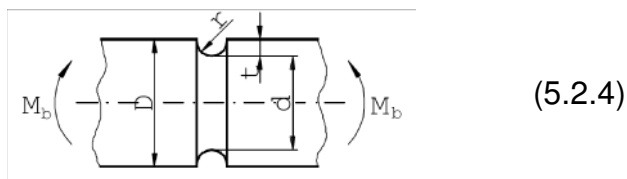
t ...Differenz der Absatzradien

$d := 30\text{mm}$

d ...kleinerer Durchmesser des Absatzes
(Probennennendurchmesser)

$$K_{tA} := 1 + \frac{1}{\sqrt{0.62 \cdot \frac{r}{t} + 11.6 \cdot \frac{r}{d} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{r}{d}\right)^2 + 0.2 \cdot \left(\frac{r}{t}\right)^3 \cdot \frac{d}{D}}}$$

$$K_{tA} = 2.079$$



$$K_{tU} := 1 + \frac{1}{\sqrt{0.2 \cdot \frac{r}{t} + 5.5 \cdot \frac{r}{d} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{r}{d}\right)^2}}$$

$$K_{tU} = 2.616$$

Aus den beiden Formzahlen für Absatz und Umlaufkerbe wird nun die Formzahl für den Absatz mit Freistich berechnet.

$$D_1 := 30\text{mm} \quad r := 1.5\text{mm}$$

$$D := 42\text{mm}$$

$$d := 29.2\text{mm}$$

$$K_{tb} := (K_{tU} - K_{tA}) \cdot \sqrt{\frac{D_1 - d}{D - d}} + K_{tA}$$

$$K_{tb} = 2.213$$

Zur Ermittlung der Stützzahlen für Normalspannung wird das bezogene Spannungsgefälle für eine Welle mit Absatz herangezogen:

$$\frac{t}{d} = 0.205 \quad \text{für } \frac{t}{d} \leq 0.25 \text{ berechnet sich } \phi \text{ wie folgt (2.3.3):}$$

$$\phi := \frac{1}{4 \cdot \sqrt{\frac{t}{r}} + 2} \quad G^\circ_{\sigma r} \text{ ...bezogenes Spannungsgefälle infolge der Konstruktion}$$

$$G^\circ_{\sigma r} := \frac{2.3}{r} \cdot (1 \cdot \phi) \quad G^\circ_{\sigma r} = 0.153 \cdot \frac{1}{\text{mm}}$$

mit diesem bezogenen Spannungsgefälle lässt sich nun die Stützzahl n_σ berechnen.

$$\text{für } 0.1 \cdot \frac{1}{\text{mm}} < G^\circ_{\sigma r} \leq 1 \frac{1}{\text{mm}} \text{ berechnet sich die Stützzahl wie folgt (2.3.2.1):}$$

$$n_{\sigma r} = 1 + \sqrt{G^\circ_{\sigma r} \cdot \text{mm} \cdot 10} - \left(a_G + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}} \right)$$

die Konstanten a_G und b_G für Gusseisen mit Kugelgraphit aus Tab 2.3.3:

$$a_G := 0.05 \quad b_G := 3200$$

$$n_{\sigma r} := 1 + \sqrt{G^\circ_{\sigma r} \cdot \text{mm} \cdot 10} - \left(a_G + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}} \right)$$

$$n_{\sigma r} = 1.196$$

$$G^{\circ}_{\sigma d} := \frac{2}{d}$$

$G^{\circ}_{\sigma d}$...bezogenes Spannungsgefälle infolge der Belastung abhängig von d

$$G^{\circ}_{\sigma d} = 0.068 \cdot \frac{1}{\text{mm}}$$

damit berechnet sich die Stützzahl $n_{\sigma d}$ für: $G^{\circ}_{\sigma d} \leq \frac{0.1}{\text{mm}}$

$$\text{mit } n_{\sigma d} := 1 + G^{\circ}_{\sigma d} \cdot \text{mm} \cdot 10^{-\left(a_G - 0.5 + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}}\right)}$$

$$\text{zu } n_{\sigma d} = 1.109$$

die Kerbwirkung in Abhängigkeit von Formzahl und Stützzahlen wird nun in der Kerbwirkungszahl zusammengefasst:

$$K_{fb} := \frac{K_{tb}}{n_{\sigma r} \cdot n_{\sigma d}} \quad K_{fb} = 1.669 \quad (2.3.10)$$

zur Ermittlung des Konstruktionsfaktors werden nun noch folgende Einflüsse berücksichtigt:

- Einfluss der Rauheit
- Einfluss der Oberflächenverfestigung
- Einfluss einer Schutzschicht

$$R_z := 9\mu\text{m}$$

R_z ...angenommene mittlere Rauheit nach dem Festwalzen der Kerbe

$$K_{R\sigma} = 1 - a_{R\sigma} \cdot \log\left(\frac{R_z}{\mu\text{m}}\right) \cdot \log\left(2 \cdot \frac{R_m}{R_{mN\min}}\right)$$

$$a_{R\sigma} := 0.16$$

$a_{R\sigma}$...Konstante (Tab 2.3.4)

$$R_{mN\min} := 400\text{MPa}$$

$R_{mN\min}$...Konstante (Tab 2.3.4)

$$K_{R\sigma} := 1 - a_{R\sigma} \cdot \log\left(\frac{R_z}{\mu\text{m}}\right) \cdot \log\left(2 \cdot \frac{R_m}{R_{mN\min}}\right)$$

$$K_{R\sigma} = 0.908$$

$K_{R\sigma}$...Rauhheitsfaktor

Ermittlung des Randschichtfaktors aus Tab 2.3.5 für Eisengusswerkstoff:

$$K_V := \begin{pmatrix} 1 \\ 1.15 \\ 1.2 \\ 1.25 \\ 1.3 \end{pmatrix} \quad K_V \text{ für alle 5 Walzzustände}$$

Die Faktoren K_S und K_{NLE} gelten nur für Aluminiumwerkstoffe bzw. Grauguss und werden hier laut FKM Richtlinie mit 1 angesetzt.

$$K_S := 1 \quad K_{NLE} := 1$$

Damit berechnet sich der Konstruktionsfaktor wie folgt:

$$K_{WKb} := \left(K_{fb} + \frac{1}{K_{R\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_V \cdot K_S \cdot K_{NLE}}$$

$$K_{WKb} = \begin{pmatrix} 1.77 \\ 1.539 \\ 1.475 \\ 1.416 \\ 1.362 \end{pmatrix} \quad \text{Konstruktionsfaktor } K_{WKb} \text{ für alle 5 Walzzustände}$$

damit lassen sich nun die Nennwerte der Bauteilwechselfestigkeit S_{WKb} bestimmen:

$$S_{WKb} := \frac{\sigma_{Wzd}}{K_{WKb}}$$

$$S_{WKb} = \begin{pmatrix} 153.652 \\ 176.7 \\ 184.382 \\ 192.065 \\ 199.747 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Folgend werden die Theoretischen Prüfkraften berechnet welche bei gegebener Geometrie diese **Nennspannungen** verursachen:

$$S_{WKb} = \frac{F_p \cdot l}{\left(\frac{\pi \cdot d^3}{32} \right)} \quad F_p \dots \text{Prüfkraft zur Erzeugung der Nennspannung unterhalb der sich das Bauteil dauerhaft verhält}$$

$l := 81\text{mm}$

l...Hebelarm (kleine Proben)

$$F_p := \frac{\pi \cdot d^3 \cdot S_{WKb}}{32 \cdot l}$$

$$F_p = \begin{pmatrix} 4.637 \\ 5.332 \\ 5.564 \\ 5.796 \\ 6.028 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$

Prüfkraft nach Anwendung von $S = \frac{M_b}{W_b}$

mit $W_b = \frac{\pi \cdot d^3}{32}$ und $M_b := F_p \cdot l$ wobei S
immer für Nennspannung steht

Die so ermittelten Werte für F_p können als Startwerte für die
Treppenstufenversuche der Proben mit dem Nenndurchmesser 30 mm
aus dem Werkstoff ADI 800 genutzt werden.

Berechnung der Ermüdungsfestigkeit mittels Nennspannungen
nach FKM Richtlinie für Nenndurchmesser 30 mm und Werkstoff
EN-GJS-1000-5

(FKM Richtlinie Kapitel 2)

1. Werkstoffkennwerte

Technologischer Größeneinfluss:

$d_{\text{effNm}} := 60$ d_{effNm} ...Konstante für Gusseisen
mit Kugelgraphit

$d := 29.2\text{mm}$ d ...Kerbdurchmesser

$d_{\text{eff}} := d$ d_{eff} ...effektiver Durchmesser

für $d_{\text{eff}} < d_{\text{effNm}}$ $K_{\text{dm}} := 1$ K_{dm} ...technologischer Größeneinflussfaktor

$K_{\text{A}} := 1$ K_{A} ...Anisotropiefaktor

$R_{\text{mN}} := 1000\text{MPa}$ R_{mN} ...Normwert der Werkstofffestigkeit

$R_{\text{m}} := K_{\text{dm}} \cdot K_{\text{A}} \cdot R_{\text{mN}} = 1000 \cdot \text{MPa}$

$f_{\text{W}\sigma} := 0.34$ $f_{\text{W}\sigma}$...Zugdruckwechselfestigkeitsfaktor (2.2.1)

$\sigma_{\text{Wzd}} := f_{\text{W}\sigma} \cdot R_{\text{m}}$ σ_{Wzd} ...Bauteilwechselfestigkeit

$\sigma_{\text{Wzd}} = 340 \cdot \text{MPa}$

$K_{\text{TD}} := 1$ K_{TD} ...Temperaturfaktor für normale
Temperatur (2.2.3.1)

2. Konstruktionskennwerte

$K_{\text{WKb}} = \left(K_{\text{fb}} + \frac{1}{K_{\text{R}\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_{\text{V}} \cdot K_{\text{S}} \cdot K_{\text{NLE}}}$ K_{WKb} ...Konstruktionsfaktor
für Biegung (2.3.1.1)

$K_{\text{fb}} = \frac{K_{\text{tb}}}{n_{\sigma\text{r}} \cdot n_{\sigma\text{d}}}$

K_{fb} ...Kerbwirkungszahl

K_{tb} ...Formzahl für Biegung

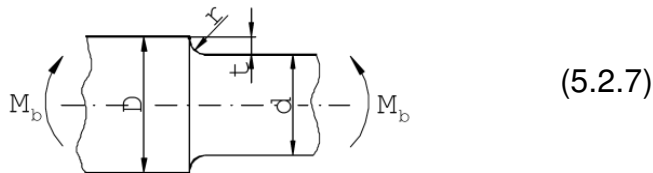
$n_{\sigma\text{r}}$...Stützzahl des Bauteiles für Normalspannung
je nach Kerbradius

$n_{\sigma\text{d}}$...Stützzahl des Bauteiles für Normalspannung
je nach Durchmesser des Teiles

$K_{\text{tb}} = (K_{\text{tU}} - K_{\text{tA}}) \cdot \sqrt{\frac{D_1 - D}{D - d}} + K_{\text{tA}}$

- K_{tU} ...Formzahl für Rundstab mit Umlaufkerbe
 K_{tA} ...Formzahl für Rundstab mit Absatz
 D_1 ...kleinerer Durchmesser des Absatzes
 d ...Durchmesser im Kerbgrund
 D ...größerer Durchmesser des Absatzes

Formzahl für Absatz bei Biegung nach FKM Richtlinie (5.2.5):



$$K_{tA} = 1 + \frac{1}{\sqrt{0.62 \cdot \frac{r}{t} + 11.6 \cdot \frac{r}{d} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{r}{d}\right)^2 + 0.2 \cdot \left(\frac{r}{t}\right)^3 \cdot \frac{d}{D}}}$$

$r := 1.5\text{mm}$

r ...Kerbradius

$D := 42\text{mm}$

D ...größerer Durchmesser des Absatzes

$t := 6\text{mm}$

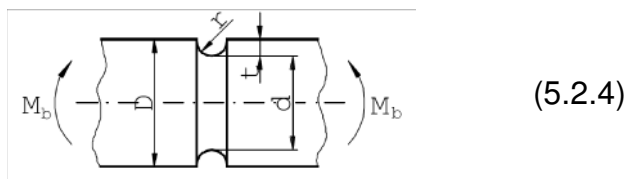
t ...Differenz der Absatzradien

$d := 30\text{mm}$

d ...kleinerer Durchmesser des Absatzes
(Probennennendurchmesser)

$$K_{tA} := 1 + \frac{1}{\sqrt{0.62 \cdot \frac{r}{t} + 11.6 \cdot \frac{r}{d} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{r}{d}\right)^2 + 0.2 \cdot \left(\frac{r}{t}\right)^3 \cdot \frac{d}{D}}}$$

$$K_{tA} = 2.079$$



$$K_{tU} := 1 + \frac{1}{\sqrt{0.2 \cdot \frac{r}{t} + 5.5 \cdot \frac{r}{d} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{r}{d}\right)^2}}$$

$$K_{tU} = 2.616$$

Aus den beiden Formzahlen für Absatz und Umlaufkerbe wird nun die Formzahl für den Absatz mit Freistich berechnet.

$$D_1 := 30\text{mm} \quad r := 1.5\text{mm}$$

$$D := 42\text{mm}$$

$$d := 29.2\text{mm}$$

$$K_{tb} := (K_{tU} - K_{tA}) \cdot \sqrt{\frac{D_1 - d}{D - d}} + K_{tA}$$

$$K_{tb} = 2.213$$

Zur Ermittlung der Stützzahlen für Normalspannung wird das bezogene Spannungsgefälle für eine Welle mit Absatz herangezogen:

$$\frac{t}{d} = 0.205 \quad \text{für } \frac{t}{d} \leq 0.25 \text{ berechnet sich } \phi \text{ wie folgt (2.3.3):}$$

$$\phi := \frac{1}{4 \cdot \sqrt{\frac{t}{r}} + 2} \quad G^\circ_{\sigma r} \text{ ...bezogenes Spannungsgefälle infolge der Konstruktion}$$

$$G^\circ_{\sigma r} := \frac{2.3}{r} \cdot (1 \cdot \phi) \quad G^\circ_{\sigma r} = 0.153 \cdot \frac{1}{\text{mm}}$$

mit diesem bezogenen Spannungsgefälle lässt sich nun die Stützzahl n_σ berechnen.

$$\text{für } 0.1 \cdot \frac{1}{\text{mm}} < G^\circ_{\sigma r} \leq 1 \frac{1}{\text{mm}} \text{ berechnet sich die Stützzahl wie folgt (2.3.2.1):}$$

$$n_{\sigma r} = 1 + \sqrt{G^\circ_{\sigma r} \cdot \text{mm} \cdot 10} - \left(a_G + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}} \right)$$

die Konstanten a_G und b_G für Gusseisen mit Kugelgraphit aus Tab 2.3.3:

$$a_G := 0.05 \quad b_G := 3200$$

$$n_{\sigma r} := 1 + \sqrt{G^\circ_{\sigma r} \cdot \text{mm} \cdot 10} - \left(a_G + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}} \right)$$

$$n_{\sigma r} = 1.17$$

$$G^{\circ}_{\sigma d} := \frac{2}{d}$$

$G^{\circ}_{\sigma d}$...bezogenes Spannungsgefälle infolge der Belastung abhängig von d

$$G^{\circ}_{\sigma d} = 0.068 \cdot \frac{1}{\text{mm}}$$

damit berechnet sich die Stützzahl $n_{\sigma d}$ für: $G^{\circ}_{\sigma d} \leq \frac{0.1}{\text{mm}}$

$$\text{mit } n_{\sigma d} := 1 + G^{\circ}_{\sigma d} \cdot \text{mm} \cdot 10^{-\left(a_G - 0.5 + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}}\right)}$$

$$\text{zu } n_{\sigma d} = 1.094$$

die Kerbwirkung in Abhängigkeit von Formzahl und Stützzahlen wird nun in der Kerbwirkungszahl zusammengefasst:

$$K_{fb} := \frac{K_{tb}}{n_{\sigma r} \cdot n_{\sigma d}} \quad K_{fb} = 1.729 \quad (2.3.10)$$

zur Ermittlung des Konstruktionsfaktors werden nun noch folgende Einflüsse berücksichtigt:

- Einfluss der Rauheit
- Einfluss der Oberflächenverfestigung
- Einfluss einer Schutzschicht

$$R_z := 9\mu\text{m}$$

R_z ...angenommene mittlere Rauheit nach dem Festwalzen der Kerbe

$$K_{R\sigma} = 1 - a_{R\sigma} \cdot \log\left(\frac{R_z}{\mu\text{m}}\right) \cdot \log\left(2 \cdot \frac{R_m}{R_{mN\min}}\right)$$

$$a_{R\sigma} := 0.16$$

$a_{R\sigma}$...Konstante (Tab 2.3.4)

$$R_{mN\min} := 400\text{MPa}$$

$R_{mN\min}$...Konstante (Tab 2.3.4)

$$K_{R\sigma} := 1 - a_{R\sigma} \cdot \log\left(\frac{R_z}{\mu\text{m}}\right) \cdot \log\left(2 \cdot \frac{R_m}{R_{mN\min}}\right)$$

$$K_{R\sigma} = 0.893$$

$K_{R\sigma}$...Rauhheitsfaktor

Ermittlung des Randschichtfaktors aus Tab 2.3.5 für Eisengusswerkstoff:

$$K_V := \begin{pmatrix} 1 \\ 1.15 \\ 1.2 \\ 1.25 \\ 1.3 \end{pmatrix} \quad K_V \text{ für alle 5 Walzzustände}$$

Die Faktoren K_S und K_{NLE} gelten nur für Aluminiumwerkstoffe bzw. Grauguss und werden hier laut FKM Richtlinie mit 1 angesetzt.

$$K_S := 1 \quad K_{NLE} := 1$$

Damit berechnet sich der Konstruktionsfaktor wie folgt:

$$K_{WKb} := \left(K_{fb} + \frac{1}{K_{R\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_V \cdot K_S \cdot K_{NLE}}$$

$$K_{WKb} = \begin{pmatrix} 1.849 \\ 1.608 \\ 1.541 \\ 1.479 \\ 1.422 \end{pmatrix} \quad \text{Konstruktionsfaktor } K_{WKb} \text{ für alle 5 Walzzustände}$$

damit lassen sich nun die Nennwerte der Bauteilwechselfestigkeit S_{WKb} bestimmen:

$$S_{WKb} := \frac{\sigma_{Wzd}}{K_{WKb}}$$

$$S_{WKb} = \begin{pmatrix} 183.913 \\ 211.5 \\ 220.696 \\ 229.891 \\ 239.087 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Folgend werden die Theoretischen Prüfkraften berechnet welche bei gegebener Geometrie diese **Nennspannungen** verursachen:

$$S_{WKb} = \frac{F_p \cdot l}{\left(\frac{\pi \cdot d^3}{32} \right)} \quad F_p \dots \text{Prüfkraft zur Erzeugung der Nennspannung unterhalb der sich das Bauteil dauerhaft verhält}$$

$l := 81\text{mm}$

l...Hebelarm (kleine Proben)

$$F_p := \frac{\pi \cdot d^3 \cdot S_{WKb}}{32 \cdot l}$$

$$F_p = \begin{pmatrix} 5.55 \\ 6.382 \\ 6.66 \\ 6.937 \\ 7.215 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$

Prüfkraft nach Anwendung von $S = \frac{M_b}{W_b}$

mit $W_b = \frac{\pi \cdot d^3}{32}$ und $M_b := F_p \cdot l$ wobei S immer für Nennspannung steht

Die so ermittelten Werte für F_p können als Startwerte für die Treppenstufenversuche der Proben mit dem Nenndurchmesser 30 mm aus dem Werkstoff ADI 1000 genutzt werden.

Theoretische Ermittlung der Dauerfestigkeit (nach FKM Richtlinie) für Nenndurchmesser 25 mm und den Werkstoff EN-GJS-800-8

(Dauerfestigkeitswert nach Kapitel 4: Spannungsnachweis mit örtlichen Spannungen, ermittelt mittels FEM Simulation)

I Werkstoffkennwerte:

Technologischer Größeneinfluss:

$d_{\text{effNm}} := 60$ d_{effNm} ...Konstante für Gusseisen mit Kugelgraphit

$d := 24.2\text{mm}$ d ...Kerbdurchmesser

$d_{\text{eff}} := d$ d_{eff} ...effektiver Durchmesser

für $d_{\text{eff}} < d_{\text{effNm}}$ $K_{\text{dm}} := 1$ K_{dm} ...technologischer Größeneinflussfaktor

$K_{\text{A}} := 1$ K_{A} ...Anisotropiefaktor

$R_{\text{mN}} := 800\text{MPa}$ R_{mN} ...Normwert der Werkstoffzugfestigkeit

$R_{\text{m}} := K_{\text{dm}} \cdot K_{\text{A}} \cdot R_{\text{mN}} = 800 \cdot \text{MPa}$

$f_{\text{W}\sigma} := 0.34$ Zugdruckwechselfestigkeitsfaktor (Tab 4.2.1)

$\sigma_{\text{Wzd}} := f_{\text{W}\sigma} \cdot R_{\text{m}}$ Bauteilnormwerte der der Wechselfestigkeitskennwerte

$K_{\text{TD}} := 1$ Temperaturfaktor für normale Temperatur

II Konstruktionskennwerte:

$$K_{\text{WK}\sigma} = \frac{1}{n_{\sigma}} \cdot \left[1 + \frac{1}{K_f} \cdot \left(\frac{1}{K_{R\sigma}} - 1 \right) \right] \cdot \frac{1}{K_V \cdot K_S \cdot K_{\text{NLE}}}$$

n_{σ} ...Stützzahl

K_f ...Konstante

$K_f := 1.5$ für Gusseisen mit Kugelgraphit

$K_{R\sigma}$...Rauheitsfaktor

K_V ...Randschichtfaktor

K_S ...Schutzschichtfaktor

K_{NLE} ...Konstante für Grauguss

$$G_{\sigma} = \frac{1}{\sigma_{1a}} \frac{\Delta \sigma_a}{\Delta S} = \frac{1}{\Delta S} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{2a}}{\sigma_{1a}} \right) \quad (4.3.16)$$

σ_{1a} ...Randspannungsamplitude

σ_{2a} ...Spannungsamplitude bei ΔS

ΔS ...Abstand des Nachbarpunktes vom Rand

Aus Ansys Simulation:

Beispielswerte für Zugspannungsamplituden mit beliebiger vorgewählter Kraft:

$$\sigma_{1a} := 169.73 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{2a} := 141.35 \text{ MPa}$$

$$\Delta S := 0.1 \text{ mm}$$

$$G_{\sigma} := \frac{1}{\Delta S} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{2a}}{\sigma_{1a}} \right) \quad G_{\sigma} = 1.672 \cdot \frac{1}{\text{mm}}$$

$$\text{für } 0.1 \cdot \frac{1}{\text{mm}} < G_{\sigma} \leq \frac{1}{\text{mm}} \text{ gilt:}$$

$$n_{\sigma} = 1 + \sqrt{G_{\sigma} \cdot \text{mm} \cdot 10}^{-\left(a_G + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}} \right)} \quad (4.3.14)$$

$$\text{für } 1 \cdot \frac{1}{\text{mm}} < G_{\sigma} \leq \frac{100}{\text{mm}} \text{ gilt:}$$

$$n_{\sigma} = 1 + \sqrt[4]{G_{\sigma} \cdot \text{mm} \cdot 10}^{-\left(a_G + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}} \right)} \quad (4.3.15)$$

aus Tabelle 4.3.2: $a_G := 0.05$ $b_G := 3200$ (für Gusseisen mit Kugelgraphit)

$$n_{\sigma} := 1 + \sqrt[4]{G_{\sigma} \cdot \text{mm} \cdot 10}^{-\left(a_G + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}} \right)}$$

$$n_{\sigma} = 1.57$$

Rauheitsfaktor:

$$K_{R\sigma} = 1 - a_{R\sigma} \cdot \log\left(\frac{R_z}{\mu\text{m}}\right) \cdot \log\left(2 \cdot \frac{R_m}{R_{mN\min}}\right)$$

$a_{R\sigma}$...Konstante

$R_{mN\min}$...Konstante

$R_z := 9 \mu\text{m}$ nach dem Festwalzen

$a_{R\sigma} := 0.16$ aus Tabelle 4.3.4

$R_{mN\min} := 400 \text{ MPa}$ aus Tabelle 4.3.4

Randschichtfaktor:

$$K_V := \begin{pmatrix} 1 \\ 1.15 \\ 1.2 \\ 1.25 \\ 1.3 \end{pmatrix} \quad \text{Schätzwerte für die fünf Walzzustände}$$

$$K_{NLE} := 1 \quad (\text{kein Grauguss})$$

$$K_S := 1 \quad (\text{keine Schutzschicht})$$

$$K_{R\sigma} := 1 - a_{R\sigma} \cdot \log\left(\frac{R_z}{\mu\text{m}}\right) \cdot \log\left(2 \cdot \frac{R_m}{R_{mNmin}}\right) \quad (4.3.26)$$

$$K_{R\sigma} = 0.908$$

Konstruktionsfaktor:

$$K_{WK\sigma} := \frac{1}{n_\sigma} \cdot \left[1 + \frac{1}{K_f} \cdot \left(\frac{1}{K_{R\sigma}} - 1 \right) \right] \cdot \frac{1}{K_V \cdot K_S \cdot K_{NLE}}$$

$$K_{WK\sigma} = \begin{pmatrix} 0.68 \\ 0.591 \\ 0.567 \\ 0.544 \\ 0.523 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{Wzd} := f_{W\sigma} \cdot R_m \quad \sigma_{Wzd} = 272 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{WK} := \frac{\sigma_{Wzd}}{K_{WK\sigma}} \quad \sigma_{WK} = \begin{pmatrix} 400.023 \\ 460.026 \\ 480.027 \\ 500.028 \\ 520.03 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Da die Spannungsamplituden infolge einer Kraft von 1370N ermittelt wurden ergeben sich die erforderlichen Prüfkkräfte für die anderen Spannungsamplituden infolge einer linearen Interpolation zu:

$$\frac{1370\text{kN}}{169.73\text{MPa}} = \frac{F_P}{\sigma_{WK}}$$

$$F_P := \frac{1370\text{N} \cdot \sigma_{WK}}{\sigma_{1a}}$$

$$F_P = \begin{pmatrix} 3.229 \\ 3.713 \\ 3.875 \\ 4.036 \\ 4.197 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$

Theoretische Ermittlung der Dauerfestigkeit (nach FKM Richtlinie) für Nenndurchmesser 25 mm und den Werkstoff EN-GJS-1000-5

(Dauerfestigkeitswert nach Kapitel 4: Spannungsnachweis mit örtlichen Spannungen, ermittelt mittels FEM Simulation)

I Werkstoffkennwerte:

Technologischer Größeneinfluss:

$d_{\text{effNm}} := 60$ d_{effNm} ...Konstante für Gusseisen mit Kugelgraphit

$d := 24.2\text{mm}$ d ...Kerbdurchmesser

$d_{\text{eff}} := d$ d_{eff} ...effektiver Durchmesser

für $d_{\text{eff}} < d_{\text{effNm}}$ $K_{\text{dm}} := 1$ K_{dm} ...technologischer Größeneinflussfaktor

$K_{\text{A}} := 1$ K_{A} ...Anisotropiefaktor

$R_{\text{mN}} := 1000\text{MPa}$ R_{mN} ...Normwert der Werkstoffzugfestigkeit

$R_{\text{m}} := K_{\text{dm}} \cdot K_{\text{A}} \cdot R_{\text{mN}} = 1000 \cdot \text{MPa}$

$f_{\text{W}\sigma} := 0.34$ Zugdruckwechselfestigkeitsfaktor (Tab 4.2.1)

$\sigma_{\text{Wzd}} := f_{\text{W}\sigma} \cdot R_{\text{m}}$ Bauteilnormwerte der der Wechselfestigkeitskennwerte

$K_{\text{TD}} := 1$ Temperaturfaktor für normale Temperatur

II Konstruktionskennwerte:

$$K_{\text{WK}\sigma} = \frac{1}{n_{\sigma}} \cdot \left[1 + \frac{1}{K_f} \cdot \left(\frac{1}{K_{R\sigma}} - 1 \right) \right] \cdot \frac{1}{K_V \cdot K_S \cdot K_{\text{NLE}}}$$

n_{σ} ...Stützzahl

K_f ...Konstante

$K_f := 1.5$ für Gusseisen mit Kugelgraphit

$K_{R\sigma}$...Rauheitsfaktor

K_V ...Randschichtfaktor

K_S ...Schutzschichtfaktor

K_{NLE} ...Konstante für Grauguss

$$G_{\sigma} = \frac{1}{\sigma_{1a}} \frac{\Delta \sigma_a}{\Delta S} = \frac{1}{\Delta S} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{2a}}{\sigma_{1a}} \right) \quad (4.3.16)$$

σ_{1a} ...Randspannungsamplitude

σ_{2a} ...Spannungsamplitude bei ΔS

ΔS ...Abstand des Nachbarpunktes vom Rand

Aus Ansys Simulation:

Beispielswerte für Zugspannungsamplituden mit beliebiger vorgewählter Kraft:

$$\sigma_{1a} := 169.73 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{2a} := 141.35 \text{ MPa}$$

$$\Delta S := 0.1 \text{ mm}$$

$$G_{\sigma} := \frac{1}{\Delta S} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{2a}}{\sigma_{1a}} \right) \quad G_{\sigma} = 1.672 \cdot \frac{1}{\text{mm}}$$

$$\text{für } 0.1 \cdot \frac{1}{\text{mm}} < G_{\sigma} \leq \frac{1}{\text{mm}} \text{ gilt:}$$

$$n_{\sigma} = 1 + \sqrt{G_{\sigma} \cdot \text{mm}} \cdot 10^{-\left(a_G + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}} \right)} \quad (4.3.14)$$

$$\text{für } 1 \cdot \frac{1}{\text{mm}} < G_{\sigma} \leq \frac{100}{\text{mm}} \text{ gilt:}$$

$$n_{\sigma} = 1 + \sqrt[4]{G_{\sigma} \cdot \text{mm}} \cdot 10^{-\left(a_G + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}} \right)} \quad (4.3.15)$$

aus Tabelle 4.3.2: $a_G := 0.05$ $b_G := 3200$ (für Gusseisen mit Kugelgraphit)

$$n_{\sigma} := 1 + \sqrt[4]{G_{\sigma} \cdot \text{mm}} \cdot 10^{-\left(a_G + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}} \right)}$$

$$n_{\sigma} = 1.494$$

Rauheitsfaktor:

$$K_{R\sigma} = 1 - a_{R\sigma} \cdot \log\left(\frac{R_z}{\mu\text{m}}\right) \cdot \log\left(2 \cdot \frac{R_m}{R_{mN\min}}\right)$$

$a_{R\sigma}$...Konstante

$R_{mN\min}$...Konstante

$R_z := 9 \mu\text{m}$ nach dem Festwalzen

$a_{R\sigma} := 0.16$ aus Tabelle 4.3.4

$R_{mN\min} := 400 \text{ MPa}$ aus Tabelle 4.3.4

Randschichtfaktor:

$$K_V := \begin{pmatrix} 1 \\ 1.15 \\ 1.2 \\ 1.25 \\ 1.3 \end{pmatrix} \quad \text{Schätzwerte für die fünf Walzzustände}$$

$$K_{NLE} := 1 \quad (\text{kein Grauguss})$$

$$K_S := 1 \quad (\text{keine Schutzschicht})$$

$$K_{R\sigma} := 1 - a_{R\sigma} \cdot \log\left(\frac{R_z}{\mu\text{m}}\right) \cdot \log\left(2 \cdot \frac{R_m}{R_{mNmin}}\right) \quad (4.3.26)$$

$$K_{R\sigma} = 0.893$$

Konstruktionsfaktor:

$$K_{WK\sigma} := \frac{1}{n_\sigma} \cdot \left[1 + \frac{1}{K_f} \cdot \left(\frac{1}{K_{R\sigma}} - 1 \right) \right] \cdot \frac{1}{K_V \cdot K_S \cdot K_{NLE}}$$

$$K_{WK\sigma} = \begin{pmatrix} 0.723 \\ 0.629 \\ 0.602 \\ 0.578 \\ 0.556 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{Wzd} := f_{W\sigma} \cdot R_m \quad \sigma_{Wzd} = 340 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{WK} := \frac{\sigma_{Wzd}}{K_{WK\sigma}} \quad \sigma_{WK} = \begin{pmatrix} 470.34 \\ 540.891 \\ 564.408 \\ 587.925 \\ 611.442 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Da die Spannungsamplituden infolge einer Kraft von 1370N ermittelt wurden ergeben sich die erforderlichen Prüfkkräfte für die anderen Spannungsamplituden infolge einer linearen Interpolation zu:

$$\frac{1370\text{kN}}{169.73\text{MPa}} = \frac{F_P}{\sigma_{WK}}$$

$$F_P := \frac{1370\text{N} \cdot \sigma_{WK}}{\sigma_{1a}}$$

$$F_P = \begin{pmatrix} 3.796 \\ 4.366 \\ 4.556 \\ 4.746 \\ 4.935 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$

Theoretische Ermittlung der Dauerfestigkeit (nach FKM Richtlinie) für Nenndurchmesser 30 mm und den Werkstoff EN-GJS-800-8

(Dauerfestigkeitswert nach Kapitel 4: Spannungsnachweis mit örtlichen Spannungen, ermittelt mittels FEM Simulation)

I Werkstoffkennwerte:

Technologischer Größeneinfluss:

$d_{\text{effNm}} := 60$ d_{effNm} ...Konstante für Gusseisen mit Kugelgraphit

$d := 29.2\text{mm}$ d ...Kerbdurchmesser

$d_{\text{eff}} := d$ d_{eff} ...effektiver Durchmesser

für $d_{\text{eff}} < d_{\text{effNm}}$ $K_{\text{dm}} := 1$ K_{dm} ...technologischer Größeneinflussfaktor

$K_{\text{A}} := 1$ K_{A} ...Anisotropiefaktor

$R_{\text{mN}} := 800\text{MPa}$ R_{mN} ...Normwert der Werkstoffzugfestigkeit

$R_{\text{m}} := K_{\text{dm}} \cdot K_{\text{A}} \cdot R_{\text{mN}} = 800 \cdot \text{MPa}$

$f_{\text{W}\sigma} := 0.34$ Zugdruckwechselfestigkeitsfaktor (Tab 4.2.1)

$\sigma_{\text{Wzd}} := f_{\text{W}\sigma} \cdot R_{\text{m}}$ Bauteilnormwerte der der Wechselfestigkeitskennwerte

$K_{\text{TD}} := 1$ Temperaturfaktor für normale Temperatur

II Konstruktionskennwerte:

$$K_{\text{WK}\sigma} = \frac{1}{n_{\sigma}} \cdot \left[1 + \frac{1}{K_{\text{f}}} \cdot \left(\frac{1}{K_{\text{R}\sigma}} - 1 \right) \right] \cdot \frac{1}{K_{\text{V}} \cdot K_{\text{S}} \cdot K_{\text{NLE}}}$$

n_{σ} ...Stützzahl

K_{f} ...Konstante

$K_{\text{f}} := 1.5$ für Gusseisen mit Kugelgraphit

$K_{\text{R}\sigma}$...Rauheitsfaktor

K_{V} ...Randschichtfaktor

K_{S} ...Schutzschichtfaktor

K_{NLE} ...Konstante für Grauguss

$$G_{\sigma} = \frac{1}{\sigma_{1a}} \frac{\Delta \sigma_a}{\Delta S} = \frac{1}{\Delta S} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{2a}}{\sigma_{1a}} \right) \quad (\text{Tab 4.3.16})$$

σ_{1a} ...Randspannungsamplitude

σ_{2a} ...Spannungsamplitude bei ΔS

ΔS ...Abstand des Nachbarpunktes vom Rand

Aus Ansys Simulation:

Beispielswerte für Zugspannungsamplituden mit beliebiger vorgewählter Kraft:

$$\sigma_{1a} := 238.43 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{2a} := 208.35 \text{ MPa}$$

$$\Delta S := 0.1 \text{ mm}$$

$$G_{\sigma} := \frac{1}{\Delta S} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{2a}}{\sigma_{1a}} \right) \quad G_{\sigma} = 1.262 \cdot \frac{1}{\text{mm}}$$

$$\text{für } 0.1 \cdot \frac{1}{\text{mm}} < G_{\sigma} \leq \frac{1}{\text{mm}} \quad \text{gilt:}$$

$$n_{\sigma} = 1 + \sqrt{G_{\sigma} \cdot \text{mm} \cdot 10}^{-\left(a_G + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}} \right)}$$

$$\text{für } 1 \cdot \frac{1}{\text{mm}} < G_{\sigma} \leq \frac{100}{\text{mm}} \quad \text{gilt:}$$

$$n_{\sigma} = 1 + \sqrt[4]{G_{\sigma} \cdot \text{mm} \cdot 10}^{-\left(a_G + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}} \right)}$$

aus Tabelle 4.3.2: $a_G := 0.05$ $b_G := 3200$ (für Gusseisen mit Kugelgraphit)

$$n_{\sigma} := 1 + \sqrt[4]{G_{\sigma} \cdot \text{mm} \cdot 10}^{-\left(a_G + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}} \right)}$$

$$n_{\sigma} = 1.531$$

Rauheitsfaktor:

$$K_{R\sigma} = 1 - a_{R\sigma} \cdot \log\left(\frac{R_z}{\mu\text{m}}\right) \cdot \log\left(2 \cdot \frac{R_m}{R_{mN\min}}\right) \quad (4.3.26)$$

$a_{R\sigma}$...Konstante

$R_{mN\min}$...Konstante

$R_z := 9 \mu\text{m}$ nach dem Festwalzen

$a_{R\sigma} := 0.16$ aus Tabelle 4.3.4

$R_{mN\min} := 400 \text{ MPa}$ aus Tabelle 4.3.4

Randschichtfaktor:

$$K_V := \begin{pmatrix} 1 \\ 1.15 \\ 1.2 \\ 1.25 \\ 1.3 \end{pmatrix}$$

$$K_{NLE} := 1 \quad (\text{kein Grauguss})$$

$$K_S := 1 \quad (\text{keine Schutzschicht})$$

$$K_{R\sigma} := 1 - a_{R\sigma} \cdot \log\left(\frac{R_z}{\mu m}\right) \cdot \log\left(2 \cdot \frac{R_m}{R_m N_{min}}\right)$$

$$K_{R\sigma} = 0.908$$

Konstruktionsfaktor:

$$K_{WK\sigma} := \frac{1}{n_\sigma} \cdot \left[1 + \frac{1}{K_f} \cdot \left(\frac{1}{K_{R\sigma}} - 1 \right) \right] \cdot \frac{1}{K_V \cdot K_S \cdot K_{NLE}}$$

$$K_{WK\sigma} = \begin{pmatrix} 0.697 \\ 0.606 \\ 0.581 \\ 0.558 \\ 0.536 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{Wzd} := f_{W\sigma} \cdot R_m \quad \sigma_{Wzd} = 272 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{WK} := \frac{\sigma_{Wzd}}{K_{WK\sigma}} \quad \sigma_{WK} = \begin{pmatrix} 390.148 \\ 448.67 \\ 468.177 \\ 487.685 \\ 507.192 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Da die Spannungsamplituden infolge einer Kraft von 3000N ermittelt wurden ergeben sich die erforderlichen Prüfkkräfte aus einer linearen Interpolation zu:

$$\frac{3000\text{N}}{\sigma_{1a}} = \frac{F_P}{\sigma_{WK}}$$

$$F_P := \frac{3000\text{N} \cdot \sigma_{WK}}{\sigma_{1a}}$$

$$F_P = \begin{pmatrix} 4.909 \\ 5.645 \\ 5.891 \\ 6.136 \\ 6.382 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$

Theoretische Ermittlung der Dauerfestigkeit (nach FKM Richtlinie) für Nenndurchmesser 30 mm und den Werkstoff EN-GJS-1000-5

(Dauerfestigkeitswert nach Kapitel 4: Spannungsnachweis mit örtlichen Spannungen, ermittelt mittels FEM Simulation)

I Werkstoffkennwerte:

Technologischer Größeneinfluss:

$d_{\text{effNm}} := 60$ d_{effNm} ...Konstante für Gusseisen mit Kugelgraphit

$d := 29.2\text{mm}$ d ...Kerbdurchmesser

$d_{\text{eff}} := d$ d_{eff} ...effektiver Durchmesser

für $d_{\text{eff}} < d_{\text{effNm}}$ $K_{\text{dm}} := 1$ K_{dm} ...technologischer Größeneinflussfaktor

$K_{\text{A}} := 1$ K_{A} ...Anisotropiefaktor

$R_{\text{mN}} := 1000\text{MPa}$ R_{mN} ...Normwert der Werkstoffzugfestigkeit

$R_{\text{m}} := K_{\text{dm}} \cdot K_{\text{A}} \cdot R_{\text{mN}} = 1000 \cdot \text{MPa}$

$f_{\text{W}\sigma} := 0.34$ Zugdruckwechselfestigkeitsfaktor (Tab 4.2.1)

$\sigma_{\text{Wzd}} := f_{\text{W}\sigma} \cdot R_{\text{m}}$ Bauteilnormwerte der der Wechselfestigkeitskennwerte

$K_{\text{TD}} := 1$ Temperaturfaktor für normale Temperatur

II Konstruktionskennwerte:

$$K_{\text{WK}\sigma} = \frac{1}{n_{\sigma}} \cdot \left[1 + \frac{1}{K_{\text{f}}} \cdot \left(\frac{1}{K_{\text{R}\sigma}} - 1 \right) \right] \cdot \frac{1}{K_{\text{V}} \cdot K_{\text{S}} \cdot K_{\text{NLE}}}$$

n_{σ} ...Stützzahl

K_{f} ...Konstante $K_{\text{f}} := 1.5$ für Gusseisen mit Kugelgraphit

$K_{\text{R}\sigma}$...Rauheitsfaktor

K_{V} ...Randschichtfaktor

K_{S} ...Schutzschichtfaktor

K_{NLE} ...Konstante für Grauguss

$$G_{\sigma} = \frac{1}{\sigma_{1a}} \frac{\Delta \sigma_a}{\Delta S} = \frac{1}{\Delta S} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{2a}}{\sigma_{1a}} \right) \quad (\text{Tab 4.3.16})$$

σ_{1a} ...Randspannungsamplitude

σ_{2a} ...Spannungsamplitude bei ΔS

ΔS ...Abstand des Nachbarpunktes vom Rand

Aus Ansys Simulation:

Beispielswerte für Zugspannungsamplituden mit beliebiger vorgewählter Kraft:

$$\sigma_{1a} := 238.43 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{2a} := 208.35 \text{ MPa}$$

$$\Delta S := 0.1 \text{ mm}$$

$$G_{\sigma} := \frac{1}{\Delta S} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{2a}}{\sigma_{1a}} \right) \quad G_{\sigma} = 1.262 \cdot \frac{1}{\text{mm}}$$

$$\text{für } 0.1 \cdot \frac{1}{\text{mm}} < G_{\sigma} \leq \frac{1}{\text{mm}} \quad \text{gilt:}$$

$$n_{\sigma} = 1 + \sqrt{G_{\sigma} \cdot \text{mm} \cdot 10}^{-\left(a_G + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}} \right)}$$

$$\text{für } 1 \cdot \frac{1}{\text{mm}} < G_{\sigma} \leq \frac{100}{\text{mm}} \quad \text{gilt:}$$

$$n_{\sigma} = 1 + \sqrt[4]{G_{\sigma} \cdot \text{mm} \cdot 10}^{-\left(a_G + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}} \right)}$$

aus Tabelle 4.3.2: $a_G := 0.05$ $b_G := 3200$ (für Gusseisen mit Kugelgraphit)

$$n_{\sigma} := 1 + \sqrt[4]{G_{\sigma} \cdot \text{mm} \cdot 10}^{-\left(a_G + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}} \right)}$$

$$n_{\sigma} = 1.46$$

Rauheitsfaktor:

$$K_{R\sigma} = 1 - a_{R\sigma} \cdot \log\left(\frac{R_z}{\mu\text{m}}\right) \cdot \log\left(2 \cdot \frac{R_m}{R_{mN\min}}\right) \quad (4.3.26)$$

$a_{R\sigma}$...Konstante

$R_{mN\min}$...Konstante

$R_z := 9 \mu\text{m}$ nach dem Festwalzen

$a_{R\sigma} := 0.16$ aus Tabelle 4.3.4

$R_{mN\min} := 400 \text{ MPa}$ aus Tabelle 4.3.4

Randschichtfaktor:

$$K_V := \begin{pmatrix} 1 \\ 1.15 \\ 1.2 \\ 1.25 \\ 1.3 \end{pmatrix}$$

$$K_{NLE} := 1 \quad (\text{kein Grauguss})$$

$$K_S := 1 \quad (\text{keine Schutzschicht})$$

$$K_{R\sigma} := 1 - a_{R\sigma} \cdot \log\left(\frac{R_z}{\mu m}\right) \cdot \log\left(2 \cdot \frac{R_m}{R_m N_{min}}\right)$$

$$K_{R\sigma} = 0.893$$

Konstruktionsfaktor:

$$K_{WK\sigma} := \frac{1}{n_\sigma} \cdot \left[1 + \frac{1}{K_f} \cdot \left(\frac{1}{K_{R\sigma}} - 1 \right) \right] \cdot \frac{1}{K_V \cdot K_S \cdot K_{NLE}}$$

$$K_{WK\sigma} = \begin{pmatrix} 0.739 \\ 0.643 \\ 0.616 \\ 0.592 \\ 0.569 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{Wzd} := f_{W\sigma} \cdot R_m \quad \sigma_{Wzd} = 340 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{WK} := \frac{\sigma_{Wzd}}{K_{WK\sigma}} \quad \sigma_{WK} = \begin{pmatrix} 459.771 \\ 528.737 \\ 551.726 \\ 574.714 \\ 597.703 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

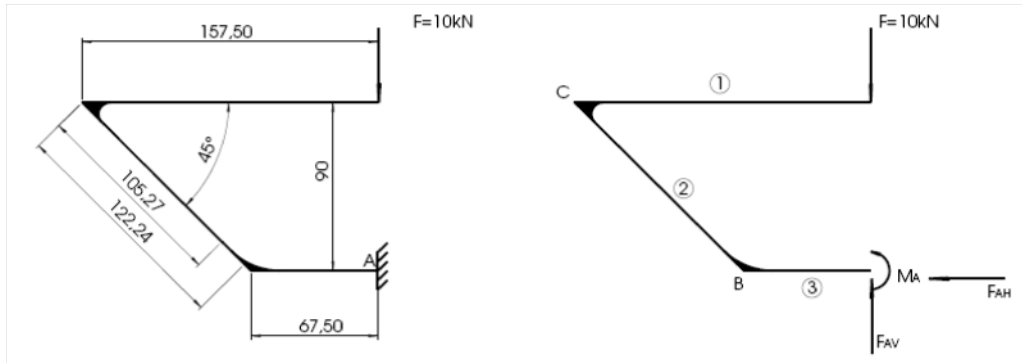
Da die Spannungsamplituden infolge einer Kraft von 3000N ermittelt wurden ergeben sich die erforderlichen Prüfkkräfte aus einer linearen Interpolation zu:

$$\frac{3000\text{N}}{\sigma_{1a}} = \frac{F_P}{\sigma_{WK}}$$

$$F_P := \frac{3000\text{N} \cdot \sigma_{WK}}{\sigma_{1a}}$$

$$F_P = \begin{pmatrix} 5.785 \\ 6.653 \\ 6.942 \\ 7.231 \\ 7.52 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$

Festigkeitsnachweis für die Grundplatte



$$F_P - F_{AV} = 0$$

Vertikales Kräftegleichgewicht

$$F_{AV} := F_P$$

$$F_{AH} := 0$$

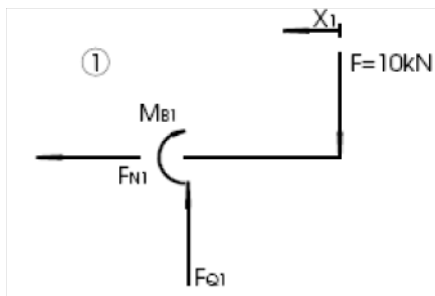
Horizontales Kräftegleichgewicht

$$M_A := 0$$

Momentengleichgewicht um Lager A

Schnittreaktionen

Abschnitt 1



$$F_P - F_{Q1} = 0$$

$$F_{Q1} := F_P$$

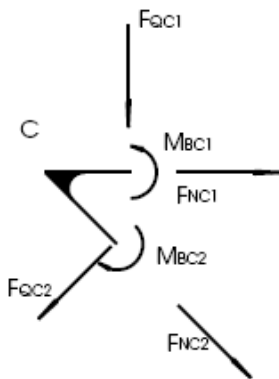
$$F_{N1} := 0$$

$$M_{B1} + F_P \cdot x_1 = 0 \quad x_1 := 157.5 \text{ mm}$$

$$M_{B1} := -F_P \cdot x_1$$

$$M_{B1} = -1.575 \times 10^3 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

Ecke C



$$M_{BC1} := M_{B1}$$

$$F_{QC1} := F_{Q1}$$

$$F_{NC1} := F_{N1}$$

$$M_{BC2} := M_{BC1}$$

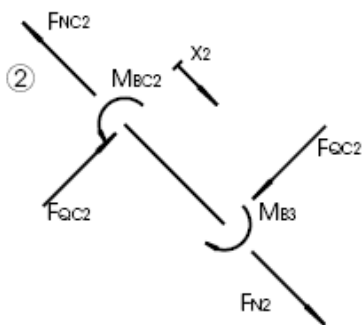
$$F_{QC1} \cdot \sin(\alpha) + F_{QC2} = 0$$

$$F_{QC2} := -F_{QC1} \cdot \sin(\alpha)$$

$$F_{QC2} = -7.071 \cdot \text{kN}$$

$$F_{QC1} \cdot \cos(\alpha) + F_{NC2} = 0$$

Abschnitt 2



$$F_{NC2} := -F_{QC1} \cdot \cos(\alpha)$$

$$F_{NC2} = -7.071 \cdot \text{kN}$$

$$F_{QC2} - F_{Q2} = 0 \quad x_2 := \begin{pmatrix} 105.3 \text{ mm} \\ 122.25 \text{ mm} \end{pmatrix}$$

$$F_{Q2} := F_{QC2}$$

$$F_{Q2} = -7.071 \cdot \text{kN}$$

$$F_{N2} - F_{NC2} = 0$$

$$F_{N2} := F_{NC2}$$

$$F_{N2} = -7.071 \cdot \text{kN}$$

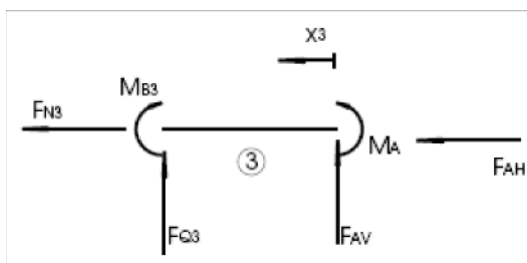
$$M_{B2} + F_{QC2} \cdot x_2 - M_{BC2} = 0$$

$$M_{B2} := M_{BC2} - F_{QC2} \cdot x_2$$

$$M_{B2} = \begin{pmatrix} -830.417 \\ -710.562 \end{pmatrix} \cdot \text{Nm}$$

Biegemoment für Q1 und Q2

Abschnitt 3



$$F_{AV} + F_{Q3} = 0$$

$$F_{Q3} := -F_{AV} \quad F_{Q3} = -10 \cdot \text{kN}$$

$$F_{N3} := 0 \quad x_3 := 67.5 \text{ mm}$$

$$M_{B3} - F_{AV} \cdot x_3 - M_A = 0$$

$$M_{B3} := M_A + F_{AV} \cdot x_3$$

$$M_{B3} = 675 \cdot \text{Nm}$$

Belastungen an den Querschnitten Q1, Q2 und Q3

Somit ergeben sich als Belastungen für die Querschnitte Q1, Q2 und Q3 folgende

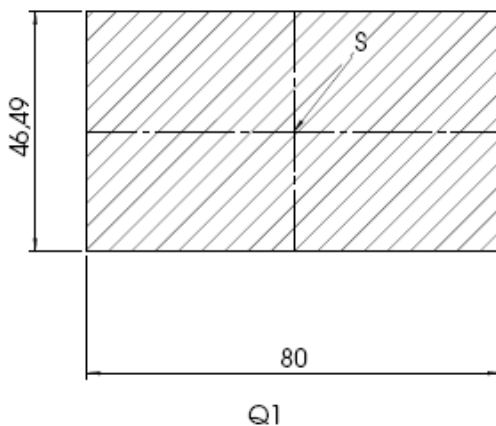
Q1: Querkraft: $F_{Q1} := |F_{Q2}| = 7.071 \cdot \text{kN}$
 Normalkraft: $F_{N1} := |F_{N2}| = 7.071 \cdot \text{kN}$
 Biegemoment: $M_{B1} := 830.417 \text{N} \cdot \text{m}$

Q2: Querkraft: $|F_{Q2}| = 7.071 \cdot \text{kN}$
 Normalkraft: $|F_{N2}| = 7.071 \cdot \text{kN}$
 Biegemoment: $M_{B2} := 710.562 \text{N} \cdot \text{m}$

Q3: Querkraft: $|F_{Q3}| = 10 \cdot \text{kN}$
 Normalkraft: $F_{N3} = 0 \cdot \text{N}$
 Biegemoment: $M_{B3} = 675 \cdot \text{Nm}$

Querschnittskennwerte:

Q1: $h_1 := 46.49 \text{mm}$ $b_1 := 80 \text{mm}$



Die y-Koordinate des Schwerpunktes bezieht sich immer auf die Unterkante des Querschnittes.

$$s_{y1} := \frac{h_1}{2} = 23.245 \cdot \text{mm}$$

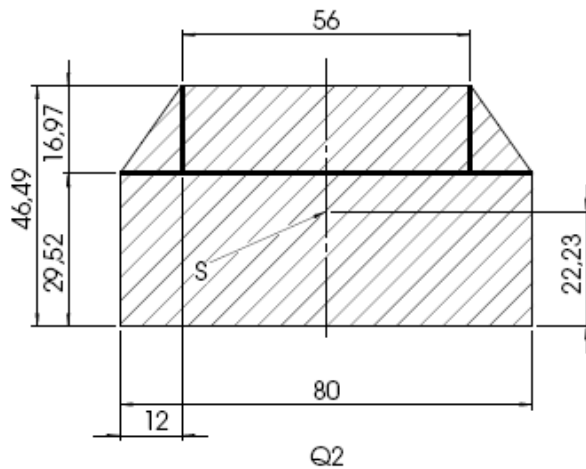
$$I_{X1} := \frac{b_1 (h_1)^3}{12} = 6.699 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

$$y_{\max 1} := |s_{y1} - h_1| = 23.245 \cdot \text{mm}$$

$$W_{b1} := \frac{I_{X1}}{y_{\max 1}} = 2.882 \times 10^4 \cdot \text{mm}^3$$

$$A_1 := h_1 \cdot b_1 = 3.719 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

Q2: $h_2 := 46.49\text{mm}$ $b_{2b} := 80\text{mm}$ $h_d := 16.97\text{mm}$
 $b_{2s} := 56\text{mm}$ $h_r := 29.52\text{mm}$ $b_d := 12\text{mm}$



Flächenkennwerte:

1. Dreiecke:

$$A_d := \frac{h_d \cdot b_d}{2} = 101.82 \cdot \text{mm}^2 \quad \text{Fläche der Dreiecke}$$

$$y_{sd} := h_r + \frac{h_d}{3} = 35.177 \cdot \text{mm} \quad \text{y-Koordinate des Flächenschwerpunktes der Dreiecke}$$

$$I_{Xd} := \frac{b_d \cdot h_d^3}{36} \cdot 2 = 3.258 \times 10^3 \cdot \text{mm}^4 \quad \text{Flächenträgheitsmoment für beide Dreiecke}$$

2. Oberes kleines Rechteck

$$A_{rk} := h_d \cdot b_{2s} = 950.32 \cdot \text{mm}^2 \quad \text{Flächeninhalt des oberen Rechteckes}$$

$$y_{srk} := h_r + \frac{h_d}{2} = 38.005 \cdot \text{mm} \quad \text{y-Koordinate des Flächenschwerpunktes des kleinen Rechteckes}$$

$$I_{Xrk} := \frac{b_{2s} \cdot h_d^3}{12} = 2.281 \times 10^4 \cdot \text{mm}^4 \quad \text{Flächenträgheitsmoment des kleinen Rechteckes}$$

3. großes Rechteck

$$A_{rg} := b_{2b} \cdot h_r = 2.362 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2 \quad \text{Flächeninhalt des großen Rechteckes}$$

$$y_{srg} := \frac{h_r}{2} = 14.76 \cdot \text{mm} \quad \text{y-Koordinate des Flächenschwerpunktes des großen Rechteckes}$$

$$I_{Xrg} := \frac{b_{2b} \cdot h_r^3}{12} = 1.715 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4 \quad \text{Flächenträgheitsmoment des Großen Rechteckes}$$

$$A_{2\text{ges}} := 2 \cdot A_d + A_{rk} + A_{rg} = 3.516 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

$$y_{s2} := \frac{1}{A_{2\text{ges}}} \cdot (y_{sd} \cdot A_d + y_{srk} \cdot A_{rk} + y_{srg} \cdot A_{rg}) = 21.207 \cdot \text{mm}$$

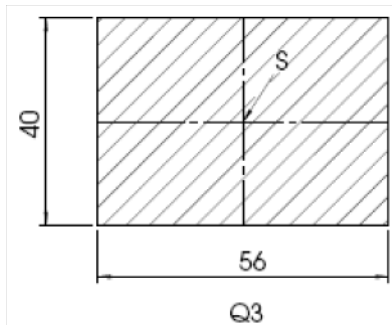
$$I_{X2\text{ges}} := I_{Xd} + (y_{s2} - y_{sd})^2 \cdot 2A_d + I_{Xrk} + (y_{s2} - y_{srk})^2 \cdot A_{rk} + I_{Xrg} + (y_{s2} - y_{srg})^2 \cdot A_{rg}$$

$$I_{X2\text{ges}} = 6.036 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

$$y_{\text{max}2} := |y_{s2} - h_2| = 25.283 \cdot \text{mm}$$

$$W_{b2} := \frac{I_{X2\text{ges}}}{y_{\text{max}2}} = 2.387 \times 10^4 \cdot \text{mm}^3$$

Q3 $h_3 := 40\text{mm}$ $b_3 := 56\text{mm}$



$$I_{X3} := \frac{b_3 \cdot h_3^3}{12} = 2.987 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

$$y_{s3} := \frac{h_3}{2} = 20 \cdot \text{mm}$$

$$y_{\text{max}3} := |y_{s3} - h_3| = 20 \cdot \text{mm}$$

$$W_{b3} := \frac{I_{X3}}{y_{\text{max}3}} = 1.493 \times 10^4 \cdot \text{mm}^3$$

$$A_3 := b_3 \cdot h_3 = 2.24 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

Berechnung der Nennspannungen an Q1, Q2 und Q3

Q1:

$$S_{zd1} := \frac{F_{N1}}{A_1} = 1.901 \cdot \text{MPa} \quad \text{Normalspannung an Q1}$$

$$T_{s1} := \frac{3 \cdot F_{Q1}}{2 \cdot A_1} = 2.852 \cdot \text{MPa} \quad \text{Biegeschub an Q1}$$

$$S_{b1} := \frac{M_{B1}}{W_{b1}} = 28.816 \cdot \text{MPa} \quad \text{Biegespannung an Q1}$$

Q2:

$$S_{zd2} := \frac{F_{N2}}{A_{2ges}} = -2.011 \cdot \text{MPa} \quad \text{Normalspannung an Q2}$$

$$T_{s2} := \frac{3F_{Q2}}{2A_{2ges}} = -3.017 \cdot \text{MPa} \quad \text{Biegeschub an Q2}$$

$$S_{b2} := \frac{M_{B2}}{W_{b2}} = 29.762 \cdot \text{MPa} \quad \text{Biegespannung an Q2}$$

Q3:

$$S_{zd3} := \frac{F_{N3}}{A_3} = 0 \quad \text{Normalspannung an Q3}$$

$$T_{s3} := \frac{3F_{Q3}}{2A_3} = -6.696 \cdot \text{MPa} \quad \text{Biegeschub an Q3}$$

$$S_{b3} := \frac{M_{B3}}{W_{b3}} = 45.201 \cdot \text{MPa} \quad \text{Biegespannung an Q3}$$

Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit Nennspannungen

FKM-Richtlinie Kap.2:

Bauteilnormwerte:

Berechnung von R_m und R_p :

$$R_{mN} := 1000 \text{MPa} \quad R_{mN} \dots \text{Probestücknormwert der Zugfestigkeit}$$

$$R_{pN} := 800 \text{MPa} \quad R_{pN} \dots \text{Robenstücknormwert der Streckgrenze}$$

$$R_m = K_{dm} \cdot K_A \cdot R_{mN} \quad K_{dm} \dots \text{Technologischer Größeneinfluss}$$

$$R_p = K_{dp} \cdot K_A \cdot R_{pN} \quad K_A \dots \text{Anisotropieeinfluss}$$

$$d_{effNm} := 16 \text{mm}$$

$$d_{effNp} := 16 \text{mm}$$

$$d_{eff1} := \frac{2 \cdot b_1 \cdot h_1}{b_1 + h_1} = 58.806 \cdot \text{mm} \quad \text{effektiver Durchmesser Querschnitt 1 (Q1)}$$

$$d_{eff2} := d_{eff1} \quad \text{effektiver Durchmesser Querschnitt 2 (Q2)}$$

$$d_{eff3} := \frac{2 \cdot b_3 \cdot h_3}{b_3 + h_3} = 46.667 \cdot \text{mm} \quad \text{effektiver Durchmesser Querschnitt 3 (Q3)}$$

da alle Querschnitte in den Grenzen $d_{\text{effNm}} < d_{\text{eff}} < d_{\text{effmaxm}}$ liegen gilt für den technologischen Größeneinflussfaktor:

$$a_{\text{dm}} := 0.3$$

$$a_{\text{dp}} := 0.4$$

$$K_{\text{dm1}} := \frac{1 - 0.7686 \cdot a_{\text{dm}} \cdot \log\left(\frac{d_{\text{eff1}}}{7.5\text{mm}}\right)}{1 - 0.7686 \cdot a_{\text{dm}} \cdot \log\left(\frac{d_{\text{effNm}}}{7.5\text{mm}}\right)} = 0.859$$

$$K_{\text{dm2}} := K_{\text{dm1}} = 0.859$$

$$K_{\text{dm3}} := \frac{1 - 0.7686 \cdot a_{\text{dm}} \cdot \log\left(\frac{d_{\text{eff3}}}{7.5\text{mm}}\right)}{1 - 0.7686 \cdot a_{\text{dm}} \cdot \log\left(\frac{d_{\text{effNm}}}{7.5\text{mm}}\right)} = 0.884$$

$$K_{\text{dp1}} := \frac{1 - 0.7686 \cdot a_{\text{dp}} \cdot \log\left(\frac{d_{\text{eff1}}}{7.5\text{mm}}\right)}{1 - 0.7686 \cdot a_{\text{dp}} \cdot \log\left(\frac{d_{\text{effNp}}}{7.5\text{mm}}\right)} = 0.807$$

$$K_{\text{dp2}} := K_{\text{dp1}} = 0.807$$

$$K_{\text{dp3}} := \frac{1 - 0.7686 \cdot a_{\text{dp}} \cdot \log\left(\frac{d_{\text{eff3}}}{7.5\text{mm}}\right)}{1 - 0.7686 \cdot a_{\text{dp}} \cdot \log\left(\frac{d_{\text{effNp}}}{7.5\text{mm}}\right)} = 0.841$$

$$K_{\text{A}} := 1$$

K_{A} ...Anisotropiefaktor

$$R_{\text{m1}} := K_{\text{dm1}} \cdot K_{\text{A}} \cdot R_{\text{mN}} = 858.95 \cdot \text{MPa}$$

$$R_{\text{m2}} := K_{\text{dm2}} \cdot K_{\text{A}} \cdot R_{\text{mN}} = 858.95 \cdot \text{MPa}$$

$$R_{\text{m3}} := K_{\text{dm3}} \cdot K_{\text{A}} \cdot R_{\text{mN}} = 884.005 \cdot \text{MPa}$$

$$R_{\text{p1}} := K_{\text{dp1}} \cdot K_{\text{A}} \cdot R_{\text{pN}} = 645.314 \cdot \text{MPa}$$

$$R_{\text{p2}} := K_{\text{dp2}} \cdot K_{\text{A}} \cdot R_{\text{pN}} = 645.314 \cdot \text{MPa}$$

$$R_{\text{p3}} := K_{\text{dp3}} \cdot K_{\text{A}} \cdot R_{\text{pN}} = 672.791 \cdot \text{MPa}$$

Aufgrund der geringen Unterschiede der Bauteilnormwerte an den Verschiedenen Querschnitten werden ab jetzt für den Nachweis nur noch R_{m1} und R_{p1} benützt.

Werkstoff: 34CrMo4

$$f_{W\sigma} := 0.45 \quad f_{W\tau} := 0.577$$

Zugdruckwechselfestigkeitsfaktor und
Schubwechselfestigkeitsfaktor für Vergütungsstahl

$$\sigma_{Wzd} := f_{W\sigma} \cdot R_{m1} = 386.528 \cdot \text{MPa}$$

$$\tau_{Ws} := f_{W\tau} \cdot \sigma_{Wzd} = 223.026 \cdot \text{MPa}$$

Temperaturfaktor bleibt unberücksichtigt (Normale Temperatur $K_T = 1$)

$$K_{WKb} = \left(K_{fb} + \frac{1}{K_{R\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_V \cdot K_S \cdot K_{NLE}} \quad \text{Konstruktionsfaktor für Biegung}$$

$$K_{WKs} = \left(K_{fs} + \frac{1}{K_{R\tau}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_V \cdot K_S} \quad \text{Konstruktionsfaktor für Biegeschub}$$

$$K_{WKzd} = \left(K_{fzd} + \frac{1}{K_{R\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_V \cdot K_S \cdot K_{NLE}} \quad \text{Konstruktionsfaktor für Zug/Druck}$$

K_f ...Kerbwirkungszahl

K_t ...Formzahl

$n_{\sigma r}$...Stützzahl des Bauteiles nach Kerbradius

$n_{\sigma d}$...Stützzahl des Bauteiles je nach Dicke des Teiles

K_R ... Einflussfaktor der Oberflächenrauheit

Formzahl für Rundstab mit Absatz (Q1 und Q2):

$r := 2.5 \text{ mm}$ Radius für Kerbe

$d := h_1$ Kleiner "Durchmesser"

$t := 13 \text{ mm}$ Höhe des Absatzes (gesch.)

$D := 60 \text{ mm}$ großer "Durchmesser"

$$K_{tb} := \frac{1}{\sqrt{0.62 \cdot \frac{r}{t} + 11.6 \cdot \frac{r}{d} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{r}{d} \right)^2 + 0.2 \left(\frac{r}{t} \right)^3 \cdot \frac{d}{D}}} = 1.063$$

$$G_{\sigma r} := \frac{2.3}{r} = 0.92 \cdot \frac{1}{\text{mm}} \quad \text{bezogenes Spannungsgefälle}$$

$a_G := 0.5$ Konstanten

$b_G := 2700$

$$G_{\sigma d} := \frac{2}{d} = 0.043 \cdot \frac{1}{\text{mm}}$$

$$n_{\sigma r} := 1 + \sqrt[2]{G_{\sigma r} \cdot \text{mm} \cdot 10} - \left(a_G + \frac{R_{m1}}{b_G \cdot \text{MPa}} \right) = 1.146$$

$$n_{\sigma d} := 1 + G_{\sigma d} \cdot \text{mm} \cdot 10 - \left(a_G - 0.5 + \frac{R_{m1}}{b_G \cdot \text{MPa}} \right) = 1.021$$

$$K_{fb} := \frac{K_{tb}}{n_{\sigma r} \cdot n_{\sigma d}} = 0.909$$

Kerbwirkungszahl für Absatz (Biegung)

$$K_{fbw} := 1.0$$

Kerbwirkungszahl für die 45° Schräge
Bild 5.3.2 FKM Richtlinie

$$K_{ts} := 1 + \frac{1}{\sqrt{3.4 \cdot \frac{r}{t} + 38 \cdot \frac{r}{d} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{r}{d}\right)^2 + 1 \cdot \left(\frac{r}{t}\right)^2 \cdot \frac{d}{D}}} = 1.56$$

$$G_{Tr} := \frac{1.15}{r} = 0.46 \cdot \frac{1}{\text{mm}}$$

$$n_{Tr} := 1 + G_{Tr} \cdot \text{mm} \cdot 10^{-\left(a_G - 0.5 + \frac{f_{W\tau} \cdot R_{m1}}{b_G \cdot \text{MPa}}\right)} = 1.301$$

$$G_{Td} := \frac{2}{d} = 0.043 \cdot \frac{1}{\text{mm}}$$

$$n_{Td} := 1 + G_{Td} \cdot \text{mm} \cdot 10^{-\left(a_G - 0.5 + \frac{f_{W\tau} \cdot R_{m1}}{b_G \cdot \text{MPa}}\right)} = 1.028$$

$$K_{fs} := \frac{K_{ts}}{n_{Tr}} = 1.199$$

Kerbwirkungszahl für Absatz (Schub)

$$K_{fsw} := 1.1$$

$$K_{tzd} := 1 + \frac{1}{\sqrt{0.62 \frac{r}{t} + 7 \cdot \frac{r}{d} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{r}{d}\right)^2}} = 2.312$$

$$K_{fzd} := \frac{K_{tzd}}{n_{\sigma r}} = 2.018$$

Kerbwirkungszahl für Absatz (Zug/Druck)

$$K_{fzd\omega} := 1.7$$

Kerbwirkungszahl für die 45° Schräge (Zug/Druck)
Bild 5.3.2 FKM Richtlinie

$$K_V := 1$$

Randschichtfaktor (Einfluss der
Oberflächenverfestigung)

$$K_S := 1$$

Schutzschichtfaktor (Nur für
Aluminiumlegierungen)

$$K_{NLE} := 1$$

Konstante für Grauguss

$$a_{R\sigma} := 0.22$$

Konstante für Stahl, sowie minimale Zugfestigkeit
(Tabelle 2.3.4 FKM-Richtlinie)

$$R_{mNmin} := 400 \text{ MPa}$$

$$R_Z := 60 \mu\text{m}$$

$$K_{R\sigma} := 1 - a_{R\sigma} \cdot \log\left(\frac{R_Z}{\mu m}\right) \cdot \log\left(\frac{2 \cdot R_{m1}}{R_{mNmin}}\right) = 0.752$$

$$K_{R\tau} := 1 - f_{W\tau} \cdot a_{R\sigma} \cdot \log\left(\frac{R_Z}{\mu m}\right) \cdot \log\left(\frac{2 \cdot R_{m1}}{R_{mNmin}}\right) = 0.857$$

$$K_{WKb} := \left(K_{fb\omega} + \frac{1}{K_{R\sigma}} - 1\right) \cdot \frac{1}{K_V \cdot K_S \cdot K_{NLE}} = 1.329$$

Konstruktionsfaktoren für Biegung und Biegeschub

$$K_{WKs} := \left(K_{fs\omega} + \frac{1}{K_{R\tau}} - 1\right) \cdot \frac{1}{K_V \cdot K_S} = 1.267$$

$$K_{WKzd} := \left(K_{fzd\omega} + \frac{1}{K_{R\sigma}} - 1\right) \cdot \frac{1}{K_V \cdot K_S \cdot K_{NLE}} = 2.029$$

Berechnung der Ertragbaren Nennwerte der Bauteilfestigkeit (Kap. 2.4 FKM-Richtlinie)

$$S_{WKb} := \frac{\sigma_{Wzd}}{K_{WKb}} = 290.823 \cdot \text{MPa}$$

$$T_{WKs} := \frac{\tau_{Ws}}{K_{WKs}} = 176.072 \cdot \text{MPa}$$

$$S_{WKzd} := \frac{\sigma_{Wzd}}{K_{WKzd}} = 190.494 \cdot \text{MPa}$$

Auslastungsgrade für Einzelne Spannungsarten:

Q1

Zug/Druck:

$$S_{azd1} := S_{zd1}$$

$$j_{ges} := 1.5$$

$$K_{BKzd} := 1$$

Betriebsfestigkeitsfaktor=1 (Gl. 2.4.48 FKM-Richtlinie)

$$S_{AKzd} := S_{WKzd}$$

Bauteilbetriebsfestigkeit=Bauteildauerfestigkeit

$$S_{BKzd} := K_{BKzd} \cdot S_{AKzd} = 190.494 \cdot \text{MPa}$$

Bauteilbetriebsfestigkeit

$$a_{BKzd} := \frac{S_{azd1}}{\frac{S_{BKzd}}{j_{ges}}} = 0.015$$

Zyklischer Auslastungsgrad für Zug/Druck

Biegung:

$$S_{ab1} := S_{b1}$$

$$K_{BKb} := 1$$

Betriebsfestigkeitsfaktor=1 (Gl. 2.4.48
FKM-Richtlinie)

$$S_{AKb} := S_{WKb}$$

Bauteilbetriebsfestigkeit=Bauteildauerfestigkeit

$$S_{BKb} := K_{BKb} \cdot S_{AKb} = 290.823 \cdot \text{MPa}$$

Bauteilbetriebsfestigkeit

$$a_{BKb} := \frac{S_{ab1}}{\frac{S_{BKb}}{j_{ges}}} = 0.149$$

Zyklischer Auslastungsgrad für Biegung

Schub:

$$T_{as1} := T_{s1}$$

$$K_{BKs} := 1$$

$$T_{AKs} := T_{WKs}$$

$$T_{BKs} := K_{BKs} \cdot T_{AKs} = 176.072 \cdot \text{MPa}$$

$$a_{BKs} := \frac{T_{as1}}{\frac{T_{BKs}}{j_{ges}}} = 0.024$$

Überlagerte Spannungen:

$$q := 0$$

q steuert Anteile an Normalspannungshypothese und
GEH (hier q=0 darum nur GEH)

$$a_{BKs_{\nu}} := q \cdot a_{NH} + (1 - q) \cdot a_{GH}$$

$$s_a := a_{BKzd} + a_{BKb}$$

$$t_a := a_{BKs}$$

$$a_{GH} := \sqrt{s_a^2 + t_a^2} = 0.165$$

$$a_{BKs_{\nu}} := (1 - q) \cdot a_{GH} = 0.165$$

Zyklischer Auslastungsgrad für Zusammengesetzte
Spannungen

Auslastungsgrad von 16,5% --> Q1 Dauerfest für 10kN

Auslastungsgrade für Einzelne Spannungsarten (Q2):

Q2

Zug/Druck:

$$S_{azd1} := |S_{zd2}|$$

$$j_{ges} := 1.5$$

$$K_{BKzd} := 1$$

Betriebsfestigkeitsfaktor=1 (Gl. 2.4.48
FKM-Richtlinie)

$$S_{AKzd} := S_{WKzd}$$

Bauteilbetriebsfestigkeit=Bauteildauerfestigkeit

$$S_{BKzd} := K_{BKzd} \cdot S_{AKzd} = 190.494 \cdot \text{MPa}$$

Bauteilbetriebsfestigkeit

$$a_{BKzd} := \frac{\frac{S_{azd1}}{S_{BKzd}}}{j_{ges}} = 0.016$$

Zyklischer Auslastungsgrad für Zug/Druck

Biegung:

$$S_{ab1} := S_{b2}$$

$$K_{BKb} := 1$$

Betriebsfestigkeitsfaktor=1 (Gl. 2.4.48
FKM-Richtlinie)

$$S_{AKb} := S_{WKb}$$

Bauteilbetriebsfestigkeit=Bauteildauerfestigkeit

$$S_{BKb} := K_{BKb} \cdot S_{AKb} = 290.823 \cdot \text{MPa}$$

Bauteilbetriebsfestigkeit

$$a_{BKb} := \frac{\frac{S_{ab1}}{S_{BKb}}}{j_{ges}} = 0.154$$

Zyklischer Auslastungsgrad für Biegung

Schub:

$$T_{as1} := |T_{s2}|$$

$$K_{BKs} := 1$$

$$T_{AKs} := T_{WKs}$$

$$T_{BKs} := K_{BKs} \cdot T_{AKs} = 176.072 \cdot \text{MPa}$$

$$a_{BKs} := \frac{\frac{T_{as1}}{T_{BKs}}}{j_{ges}} = 0.026$$

Festigkeitsnachweis für den Verbindungsbolzen

Berechnung der Nennspannungen:

Kreisquerschnitt

$$d := 15\text{mm}$$

Durchmesser des Bolzens

$$F_P := 10\text{kN}$$

Prüfkraft

$$A := \frac{\pi}{4} \cdot d^2 = 176.715 \cdot \text{mm}^2$$

Fläche des Bolzens

$$\tau_s := \frac{F_P}{2A} = 28.294 \cdot \text{MPa}$$

Schubspannung infolge der Scherwirkung

Werkstoff: C15E

Technologischer Größeneinflussfaktor:

$$a_{dm} := 0.5$$

$$a_{dp} := 0.5$$

$$d_{effNm} := 16\text{mm}$$

$$d_{effNp} := 16\text{mm}$$

$$d_{eff} := d$$

effektiver Durchmesser

$$K_{dm} := 1$$

Gleichung 1.2.8 FKM-Richtlinie

$$K_{dp} := K_{dm}$$

$$R_{mN} := 800\text{MPa}$$

$$R_{pN} := 545\text{MPa}$$

$$K_A := 1$$

Anisotropiefaktor für Stahl

$$R_m := K_{dm} \cdot K_A \cdot R_{mN} = 800 \cdot \text{MPa}$$

$$R_p := K_{dp} \cdot K_A \cdot R_{pN} = 545 \cdot \text{MPa}$$

Bauteilnormwerte der Wechselfestigkeit:

$$f_{W\sigma} := 0.4$$

Zugdruckwechselfestigkeitsfaktor

$$f_{W\tau} := \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.577$$

Schubwechselfestigkeitsfaktor

$$\sigma_{Wzd} := f_{W\sigma} \cdot R_m = 320 \cdot \text{MPa}$$

$$\tau_{Ws} := f_{W\tau} \cdot \sigma_{Wzd} = 184.752 \cdot \text{MPa}$$

Konstruktionsfaktoren

$$K_{TD} := 1$$

Temperaturfaktor für normale Temperatur

$$K_{WKs} = \left(K_{fs} + \frac{1}{K_{R\tau}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_V \cdot K_S}$$

K_{fs} ...Kerbwirkungszahl für Schub

$K_{R\tau}$...Rauheitsfaktor für Schub

K_V ...Einflussfaktor der

K_S ...Schutzschichtfaktor (nur Alu)

Keine Kerbwirkung/Rauheitswirkung, da glatter polierter Stab.
Kein Einfluss der Oberflächenbehandlung.

$$K_{WKs} := 1$$

Bauteilfestigkeit:

$$T_{WKs} := \frac{\tau_{Ws}}{K_{WKs}} = 184.752 \cdot \text{MPa}$$

Nachweis:

$$T_{as1} := \tau_s = 28.294 \cdot \text{MPa}$$

größte Spannungsamplitude

$$T_{BKs} = K_{BKs} \cdot T_{AKs}$$

K_{BKs} ...Betriebsfestigkeitsfaktor

T_{AKs} ...Bauteildauerfestigkeit

$$K_{BKs} := 1$$

Da Nachweis der Dauerfestigkeit

$$K_{AKs} := 1$$

da keine Mittelspannung

$$T_{BKs} := T_{WKs} \cdot K_{AKs} = 184.752 \cdot \text{MPa}$$

$$j_{ges} := 1.5$$

Gesamtsicherheit für Stahl

$$a_{BKs} := \frac{T_{as1}}{\frac{T_{BKs}}{j_{ges}}} = 0.23$$

Zyklischer Auslastungsgrad für Schub

Flächenpressung im Auge der Koppel:

$$b := 15 \text{ mm}$$

Breite der Koppel

$$A_{proj} := d \cdot b = 225 \cdot \text{mm}^2$$

Projezierte Fläche

$$P := \frac{F_P}{A_{proj}} = 44.444 \cdot \text{MPa}$$

Pressung bei 10kN Prüfkraft

Berechnung der Koppel

Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit Nennspannungen FKM-Richtlinie Kap.2:

$$d := 15\text{mm}$$

$$s := 15\text{mm}$$

$$b_{\text{ges}} := 25\text{mm}$$

Bauteilnormwerte:

Berechnung von R_m und R_p :

$$R_{mN} := 1000\text{MPa}$$

R_{mN} ...Probestücknormwert der Zugfestigkeit

$$R_{pN} := 800\text{MPa}$$

R_{pN} ...Robenstücknormwert der Streckgrenze

$$R_m = K_{dm} \cdot K_A \cdot R_{mN}$$

K_{dm} ...Technologischer Größeneinfluss

$$R_p = K_{dp} \cdot K_A \cdot R_{pN}$$

K_A ...Anisotropieeinfluss

$$d_{\text{effNm}} := 16\text{mm}$$

$$d_{\text{effNp}} := 16\text{mm}$$

$$d_{\text{eff}} := \frac{2 \cdot b_{\text{ges}} \cdot s}{b_{\text{ges}} + s} = 18.75 \cdot \text{mm} \quad \text{effektiver Durchmesser Querschnitt 1 (Q1)}$$

$$K_A := 1$$

da alle Querschnitte in den Grenzen $d_{\text{effNm}} < d_{\text{eff}} < d_{\text{effmaxm}}$ liegen gilt für den technologischen Größeneinflussfaktor:

$$a_{dm} := 0.3$$

$$a_{dp} := 0.4$$

$$K_{dm} := \frac{1 - 0.7686 \cdot a_{dm} \cdot \log\left(\frac{d_{\text{eff}}}{7.5\text{mm}}\right)}{1 - 0.7686 \cdot a_{dm} \cdot \log\left(\frac{d_{\text{effNm}}}{7.5\text{mm}}\right)} = 0.983$$

$$K_{dp} := \frac{1 - 0.7686 \cdot a_{dp} \cdot \log\left(\frac{d_{\text{eff}}}{7.5\text{mm}}\right)}{1 - 0.7686 \cdot a_{dp} \cdot \log\left(\frac{d_{\text{effNp}}}{7.5\text{mm}}\right)} = 0.976$$

$$R_m := R_{mN} \cdot K_A \cdot K_{dm} = 982.813 \cdot \text{MPa}$$

$$R_p := R_{pN} \cdot K_A \cdot K_{dp} = 781.152 \cdot \text{MPa}$$

Werkstoff: 34CrMo4

$$f_{W\sigma} := 0.45 \quad f_{W\tau} := 0.577$$

Zugdruckwechselfestigkeitsfaktor und
Schubwechselfestigkeitsfaktor für Vergütungsstahl

$$\sigma_{Wzd} := f_{W\sigma} \cdot R_m = 442.266 \cdot \text{MPa}$$

$$\tau_{Ws} := f_{W\tau} \cdot \sigma_{Wzd} = 255.187 \cdot \text{MPa}$$

$$K_{WKzd} = \left(K_{fzd} + \frac{1}{K_{R\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_V \cdot K_S \cdot K_{NLE}} \quad \text{Konstruktionsfaktor für Zug/Druck}$$

plastische Stützzahl für Platte mit Bohrung:

$$a_G := 0.5$$

$$b_G := 2700$$

$$\sigma_{1a} := 181.48 \text{MPa} \quad \sigma_{2a} := 154.87 \text{MPa}$$

$$\Delta\sigma_a := \sigma_{1a} - \sigma_{2a} = 26.61 \cdot \text{MPa}$$

$$\Delta s := 0.1 \text{mm}$$

$$G_\sigma := \frac{1}{\Delta s} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{2a}}{\sigma_{1a}} \right) = 1.466 \cdot \frac{1}{\text{mm}}$$

$$n_\sigma := 1 + \sqrt[4]{G_\sigma \cdot \text{mm} \cdot 10} \cdot \left(a_G + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}} \right) = 1.151$$

Rauheitsfaktor:

$$R_z := 4 \mu\text{m}$$

$$a_{R\sigma} := 0.22$$

$$R_{mNmin} := 400 \text{MPa}$$

$$K_{R\sigma} := 1 - a_{R\sigma} \cdot \log\left(\frac{R_z}{\mu\text{m}}\right) \cdot \log\left(\frac{2 \cdot R_m}{R_{mNmin}}\right) = 0.908$$

Randschichtfaktor:

$$K_V := 1$$

$$K_f := 2$$

$$K_{WK\sigma} := \frac{1}{n_\sigma} \cdot \left[1 + \frac{1}{K_f} \cdot \left(\frac{1}{K_{R\sigma}} - 1 \right) \right] \cdot \frac{1}{K_V} = 0.913$$

Bauteilfestigkeit:

$$\sigma_{WK} := \frac{\sigma_{Wzd}}{K_{WK\sigma}} = 484.411 \cdot \text{MPa}$$

Nachweis:

$$j_{ges} := 1.5$$

$$a_M := 0.35$$

Konstanten

$$b_M := -0.1$$

$$M_\sigma := a_M \cdot 10^{-3} \cdot \frac{R_m}{\text{MPa}} + b_M = 0.244$$

Mittelspannungsempfindlichkeit

$$\sigma_a := \sigma_{1a}$$

Spannungsamplitude

$$\sigma_m := \frac{\sigma_a}{2} = 90.74 \cdot \text{MPa}$$

Mittelspannung

$$K_{AK\sigma} := \frac{\frac{M_\sigma}{1 + \frac{M_\sigma}{3}}}{1 + \frac{M_\sigma}{3} \cdot \frac{\sigma_m}{\sigma_a}} = 0.835$$

Mittelspannungsfaktor für Mittelspannung

$$K_{E\sigma} := 1$$

Eigenspannungsfaktor

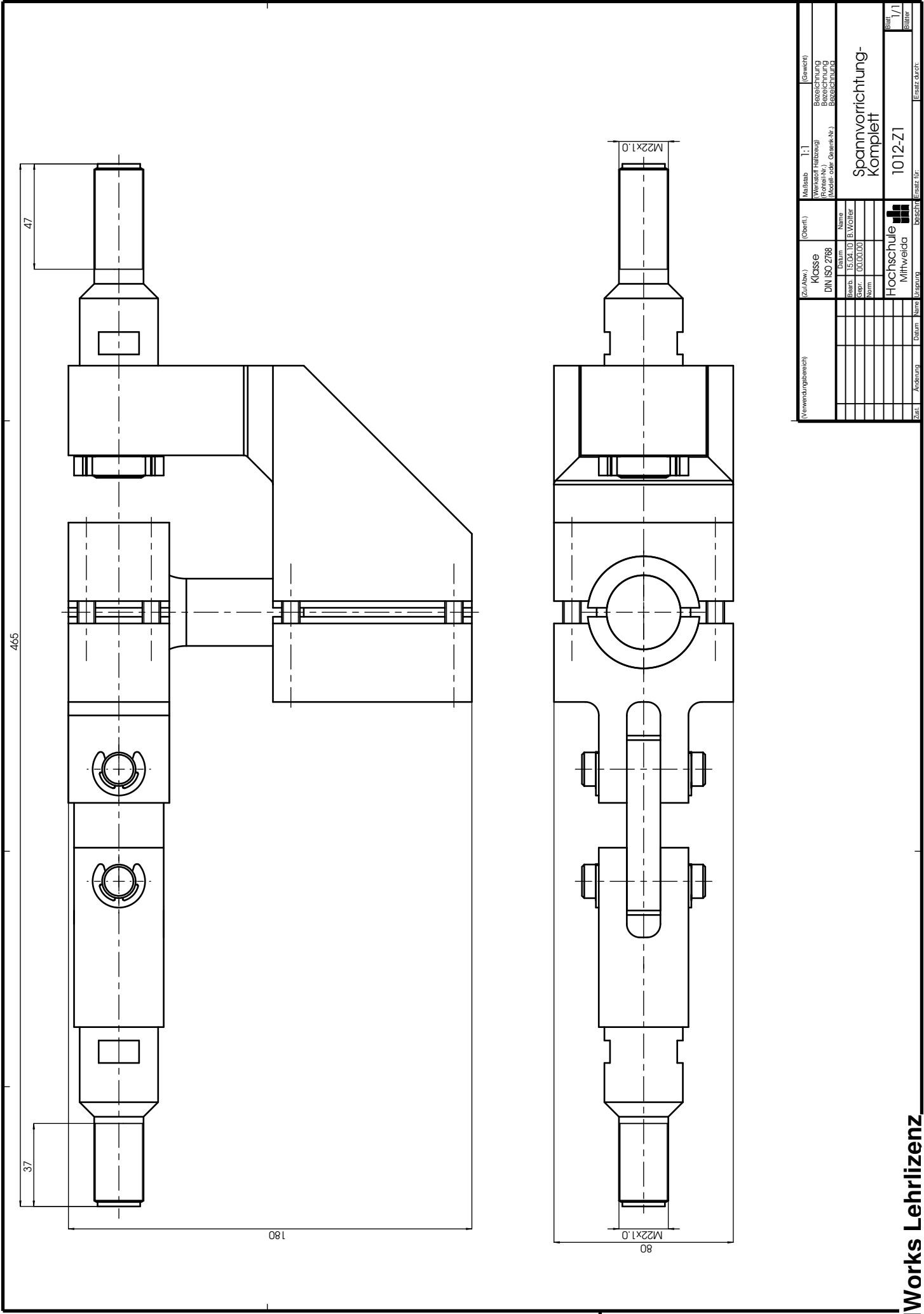
$$\sigma_{AK} := K_{AK\sigma} \cdot K_{E\sigma} \cdot \sigma_{WK} = 404.618 \cdot \text{MPa}$$

$$K_{BK\sigma} := 1$$

Betriebsfestigkeitsfaktor für Nachweis der Dauerfestigkeit

$$\sigma_{BK} := K_{BK\sigma} \cdot \sigma_{AK} = 404.618 \cdot \text{MPa}$$

$$a_{BK\sigma} := \frac{\frac{\sigma_a}{\sigma_{BK}}}{j_{\text{ges}}} = 0.673$$



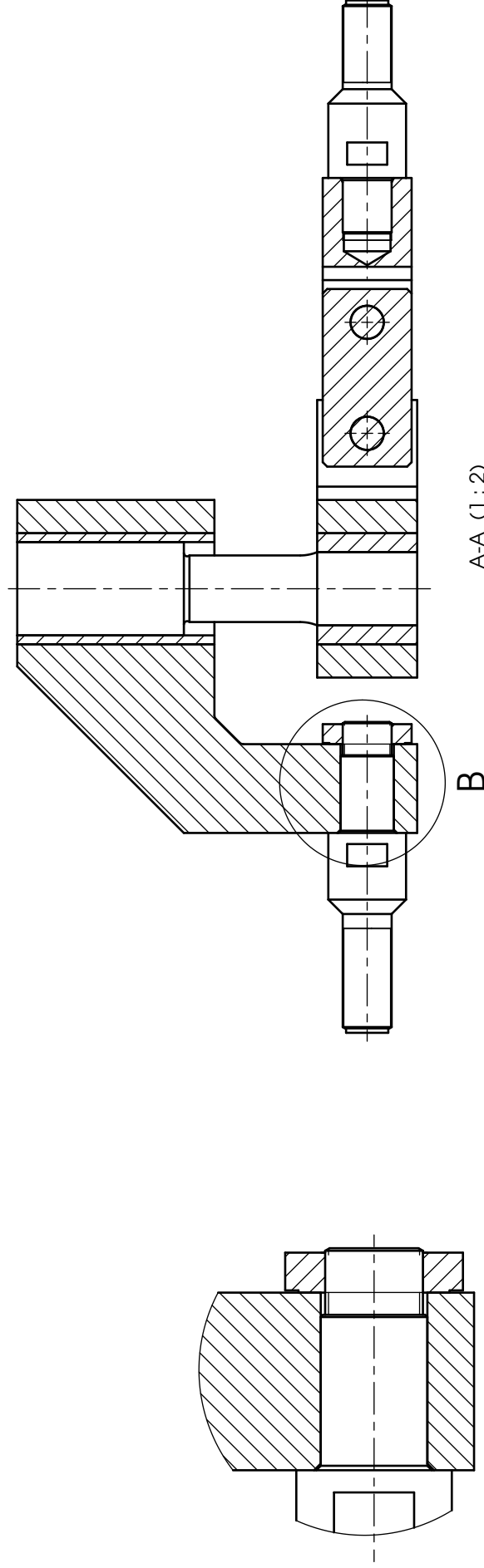
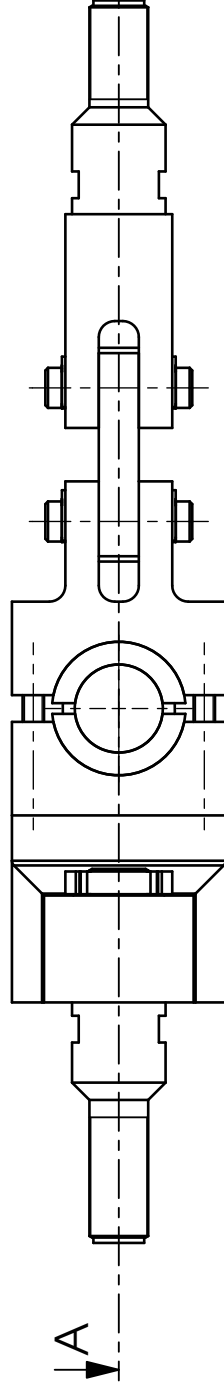
(Verwendungsbezeichnung)		Zusatz	(Oberfl.)	Maßstab	1:1	(Gewicht)
		Klasse		Werkstoff (Material)		Bezeichnung
		DIN ISO 2768		(Material-Nr.)		Bezeichnung
		Besch.	15.04.10	B. Wölter		Bezeichnung
		Gepr.	00.00.00			Bezeichnung
		Norm				Bezeichnung
		Datum				Bezeichnung
		Name				Bezeichnung
		Hochschule				Bezeichnung
		Mitbewerber				Bezeichnung
		Datum				Bezeichnung
		Änderung				Bezeichnung
		Ursprung				Bezeichnung
		Bestell-Nr.				Bezeichnung
		Erstellt durch				Bezeichnung
		Geprüft durch				Bezeichnung
		Blatt				Bezeichnung
		Blätter				Bezeichnung


Spannvorrichtung-
Komplett

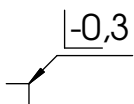
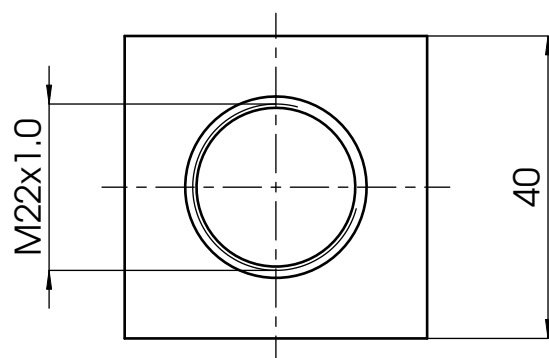
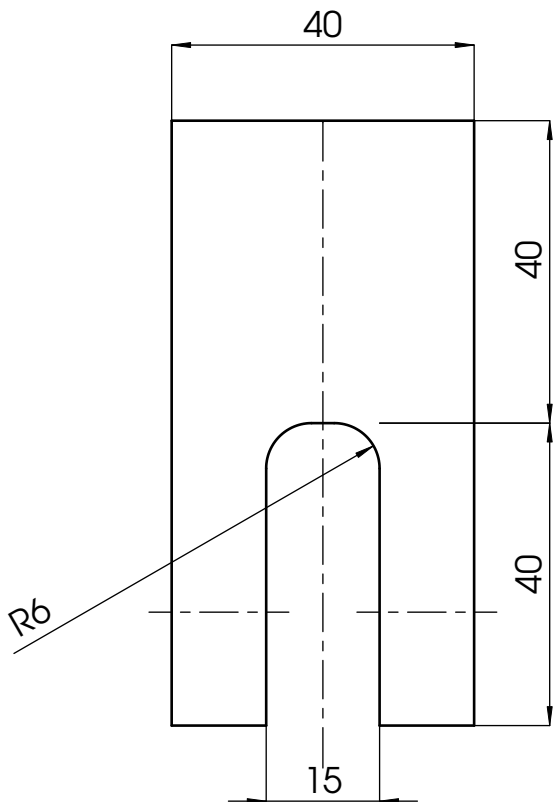
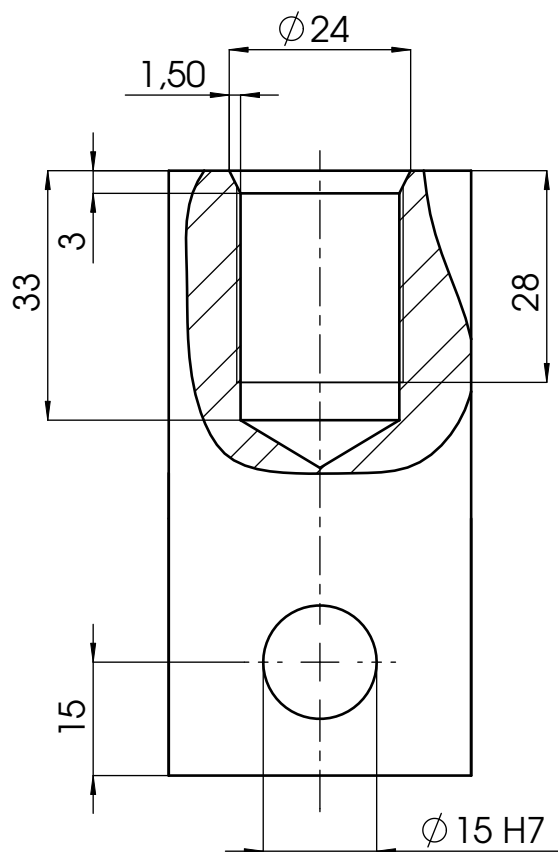
1012-Z1




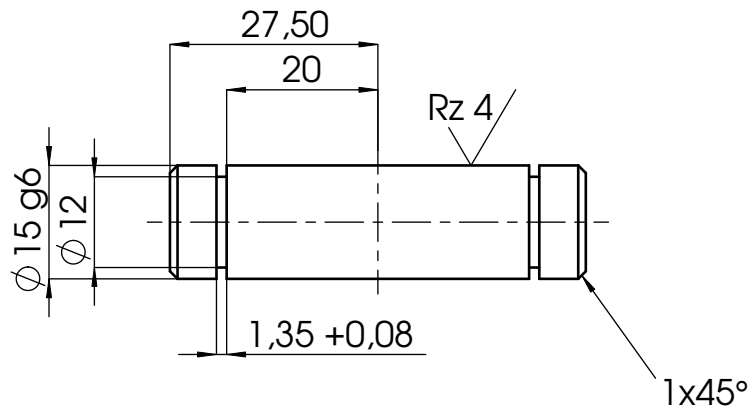
**SolidWorks Lehlizenz.
Nur für Lehrzwecke**


$$B(1:1)$$

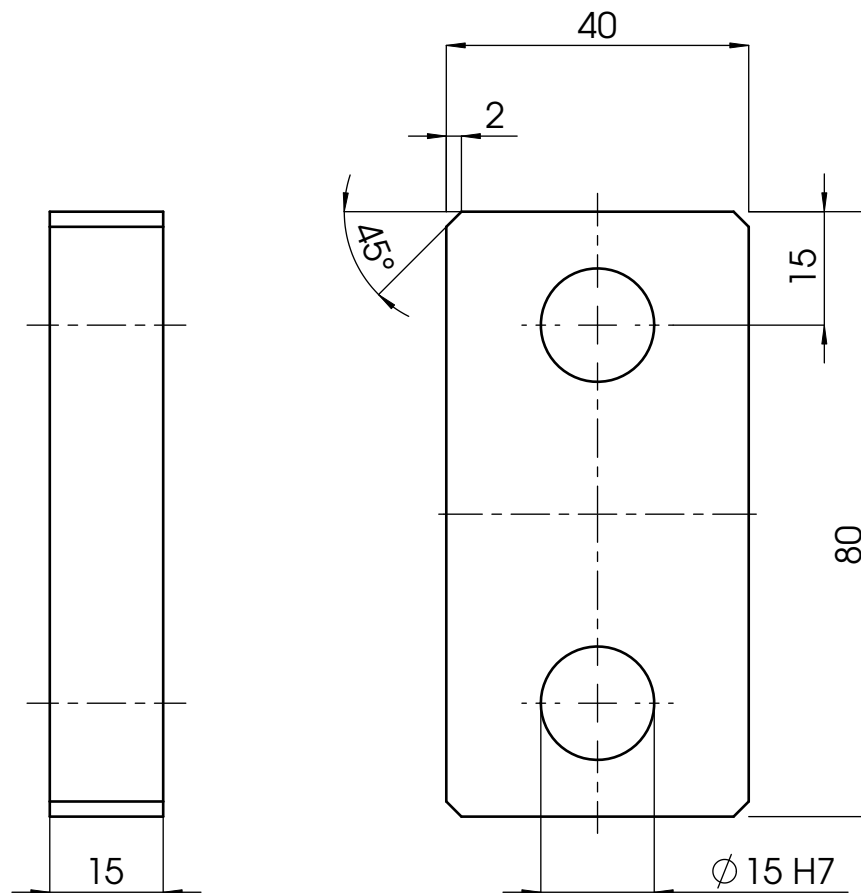
(Verwendungsbereich)	(Zul.Abw.)	Klasse DIN ISO 2768	(Oberfl.)	Maßstab 1:2	Bezeichnung Bezeichnung Bezeichnung	(Gewichtl)
		Datum	Name	(Werkstoff Halbzeug) (Rohteil-Nr.) (Modell- oder Gesenk-Nr.)		
		Bearb.	15.04.10 B.Wolter		Schnittansicht	
		Gepr.	00.00.00 Name		Funktionsweise	
		Norm				
Zust.	Änderung	Datum	Name	Hochschule  Mittweida	1012-Z3	Blatt 1/
		Ursprung	beschm	Ersatz für:	Ersatz durch:	Blätter





(Verwendungsbereich)				(Zul.Abw.) Klasse ISO 2768-mK		(Oberfl.)		Maßstab 1:1		0,7kg	
								Werkstoff: 34CrMo4			
					Datum	Name		Anbindung Krafteinleitung			
				Bearb.	15.04.10	B.Wolter					
				Gepr.	00.00.00	Name					
				Norm							
Hochschule Mittweida						1012-02				Blatt 1/1	
										Blätter	
orks Lehlizen				Datum		Name		Ursprung		beschn.	
Lehrzwecke								Ersatz für:		Ersatz durch:	

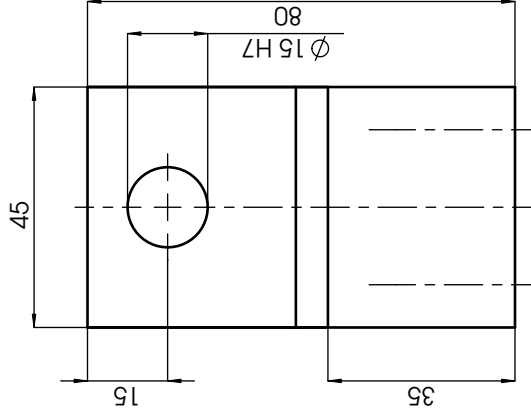
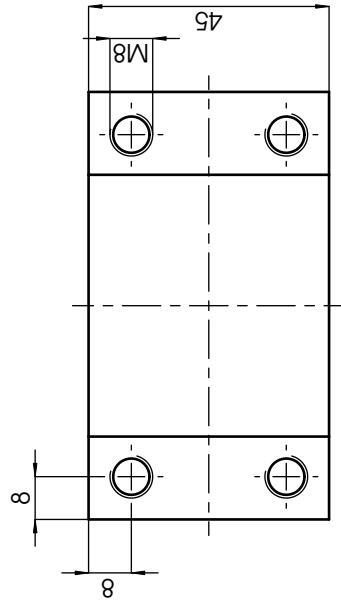
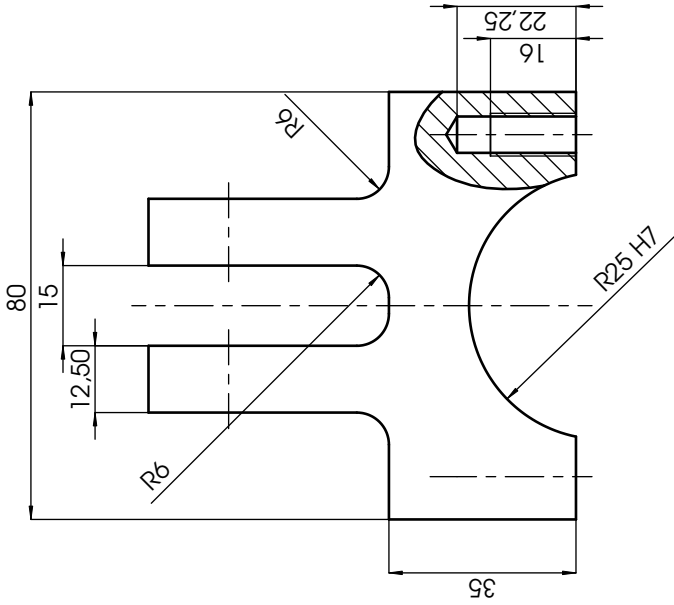


(Verwendungsbereich)				(Zul.Abw.) Klasse ISO 2768-mK		(Oberfl.)	Maßstab 1:1	0,07kg
							Werkstoff: C15E	
				Datum	Name	Bolzen		
				Bearb.	15.04.10 B.Wolter			
				Gepr.	00.00.00 Name			
				Norm				
				Hochschule Mittweida			1012-03	
SolidWorks Lehlizenz Nur für Lehrzwecke				Datum	Name	Ursprung	beschn	Ersatz für:
								Ersatz durch:




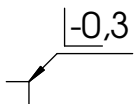
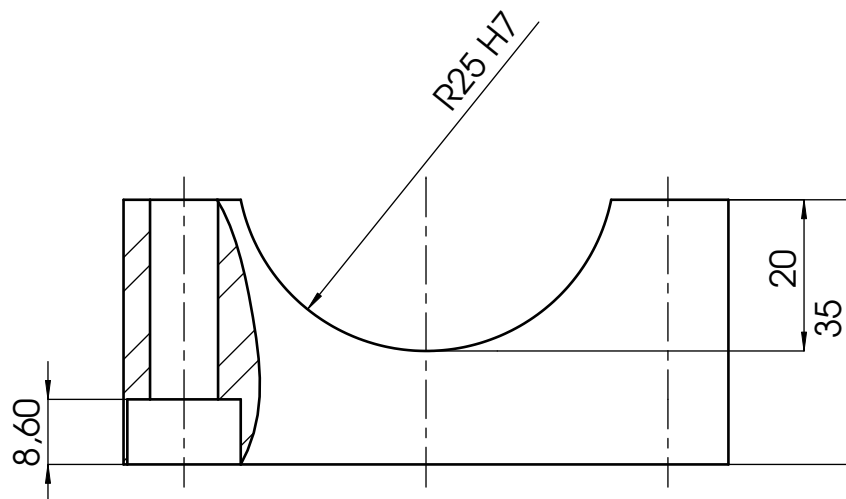
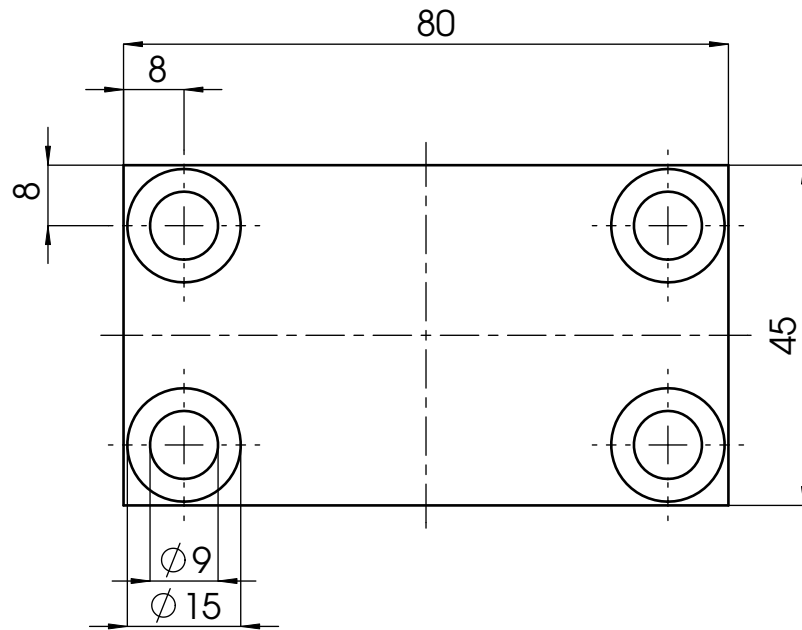

 -0,3


(Verwendungsbereich)				(Zul.Abw.) Klasse ISO 2768-mK		(Oberfl.)		Maßstab 1:1		0,3kg
								Werkstoff: 34CrMo4		
					Datum	Name	Koppel			
				Bearb.	15.04.10	B.Wolter				
				Gepr.	00.00.00	Name				
				Norm						
				Hochschule Mittweida 			1012-04			Blatt
										1/1
SolidWorks Lehlizenz Nur für Lehrzwecke				Datum	Name	Ursprung	beschn	Ersatz für:	Ersatz durch:	

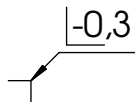
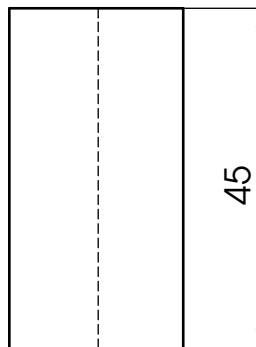
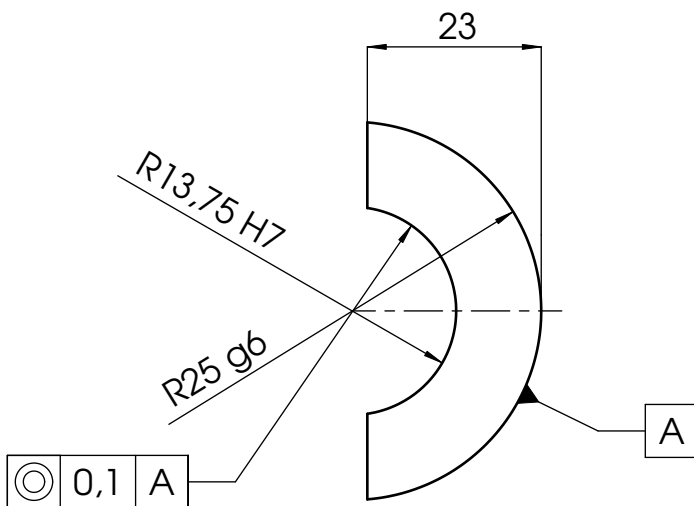



|-0,3

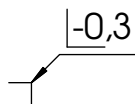
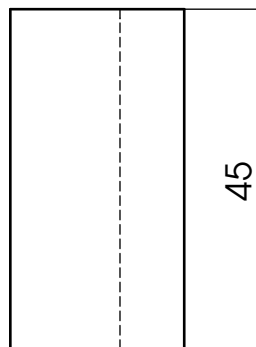
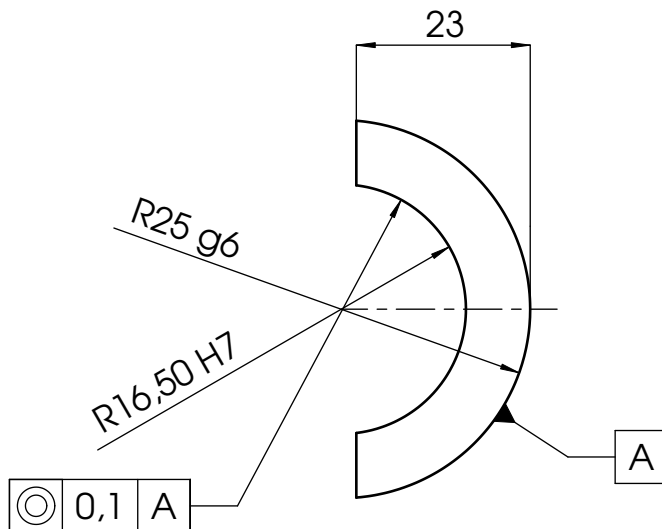
(Verwendungsbereich)				(Zul.Abw.)		(Oberfl.)		Maßstab		1:1		1kg	
				Klasse		ISO 2768-mK		Werkstoff:		34CrMo4			
						Datum	Name	Grundplatte Krafteinleitung					
						Bearb.	15.04.10						B.Wolfer
						Gepr.	00.00.00						Name
						Norm							
									1012-05				
						Hochschule				Blatt		1/1	
						Mittweida							
Zust.	Änderung	Datum	Name	Ursprung	beschni	Ersatz für:		Ersatz durch:					



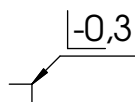
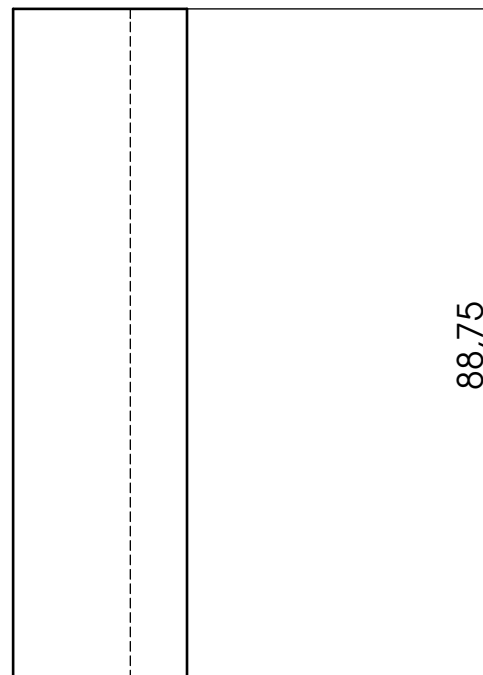
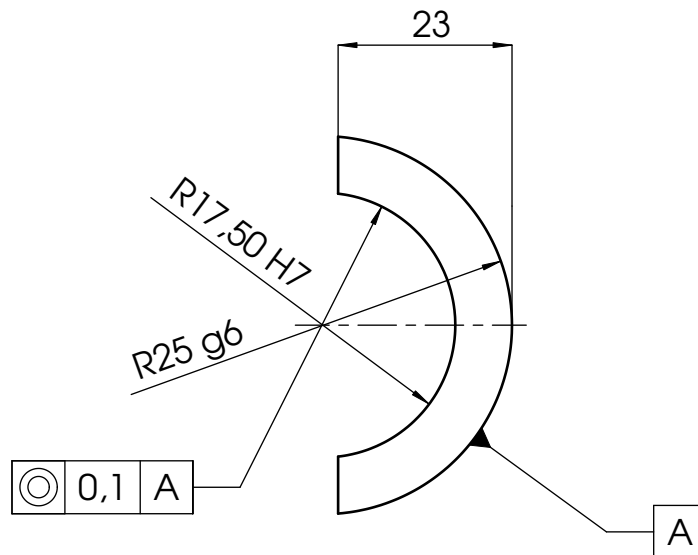
(Verwendungsbereich)				(Zul.Abw.) Klasse ISO 2768-mK		(Oberfl.)		Maßstab 1:]		0,6kg			
								Werkstoff:		34CrMo4			
					Datum	Name		Spannplatte Krafteinleitung					
				Bearb.	15.04.10	B.Wolter							
				Gepr.	00.00.00	Name							
				Norm									
								1012-06				Blatt 1/1	
orks Lehrlizenz Lehrzwecke						Hochschule Mittweida							
				Datum	Name	Ursprung	beschn.	Ersatz für:		Ersatz durch:			



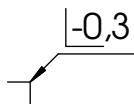
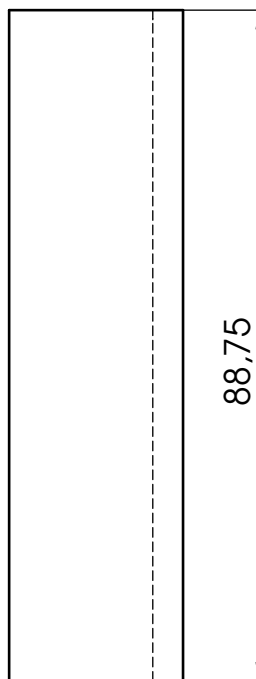
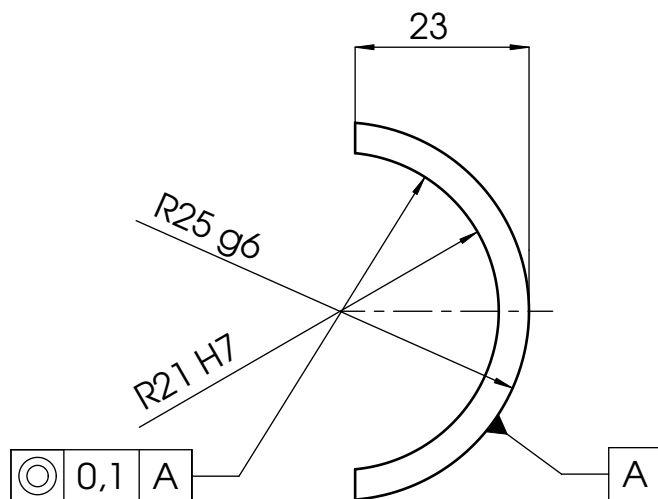
(Verwendungsbereich)				(Zul.Abw.) Klasse ISO 2768-mK		(Oberfl.)		Maßstab 1:1		0,22kg	
								Werkstoff: S235JR			
					Datum	Name		Schale Krafteinleitung D _N =25mm			
				Bearb.	15.04.10	B.Wolter					
				Gepr.	00.00.00	Name					
				Norm							
				Hochschule Mittweida 				1012-07			Blatt 1/1
								Ersatz durch:			Blätter
SolidWorks Lehrlizenz Nur für Lehrzwecke				Datum	Name	Ursprung	beschn	Ersatz für:		Ersatz durch:	




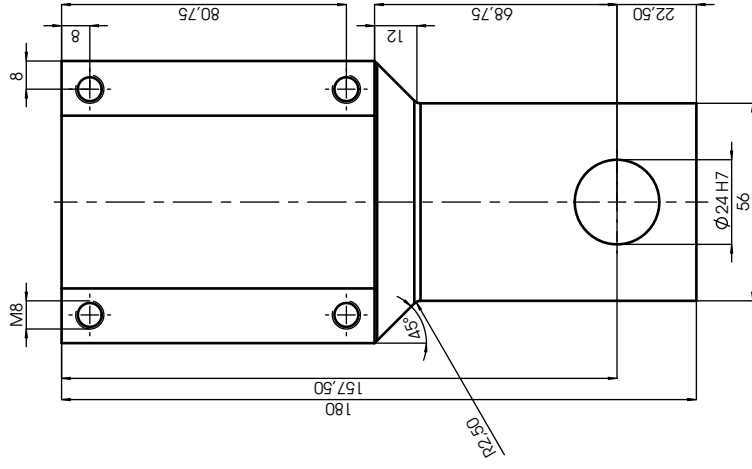
(Verwendungsbereich)				(Zul.Abw.) Klasse ISO 2768-mK		(Oberfl.)		Maßstab 1:1		0,18kg	
								Werkstoff: S325JR			
					Datum	Name		Schale Krafteinleitung D _N =30mm			
				Bearb.	15.04.10	B.Wolter					
				Gepr.	00.00.00	Name					
				Norm							
				Hochschule Mittweida				1012-08			
SolidWorks Lehrlizenz Nur für Lehrzwecke				Datum	Name	Ursprung	beschn	Ersatz für:		Ersatz durch:	
										Blatt 1/1 Blätter	



(Verwendungsbereich)				(Zul.Abw.) Klasse ISO 2768-mK		(Oberfl.)		Maßstab 1:1		0,3kg
								Werkstoff: S235JR		
					Datum	Name	Schale Festeinspannung D _N =25mm			
				Bearb.	15.04.10	B.Wolter				
				Gepr.	00.00.00	Name				
				Norm						
				Hochschule Mittweida			1012-09			Blatt 1/1
										Blätter
SolidWorks Lehrlizenz Nur für Lehrzwecke				Datum	Name	Ursprung	beschn	Ersatz für:	Ersatz durch:	

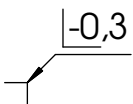
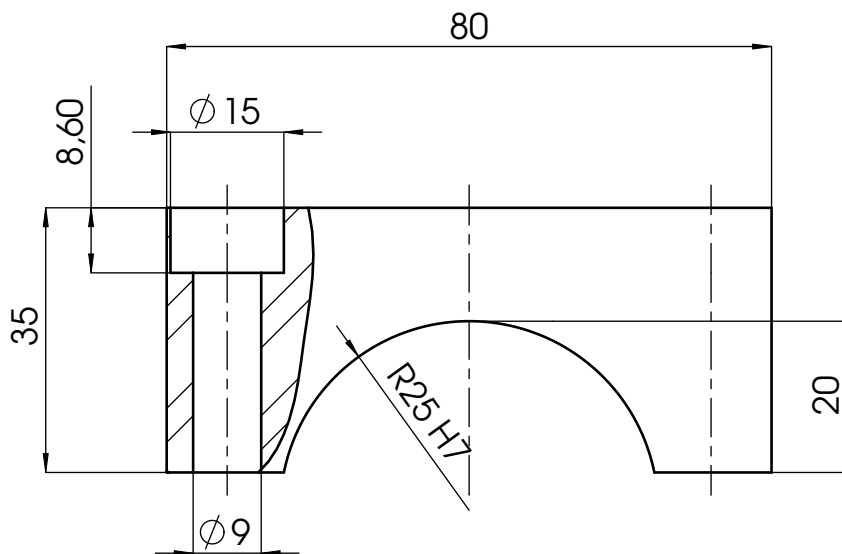
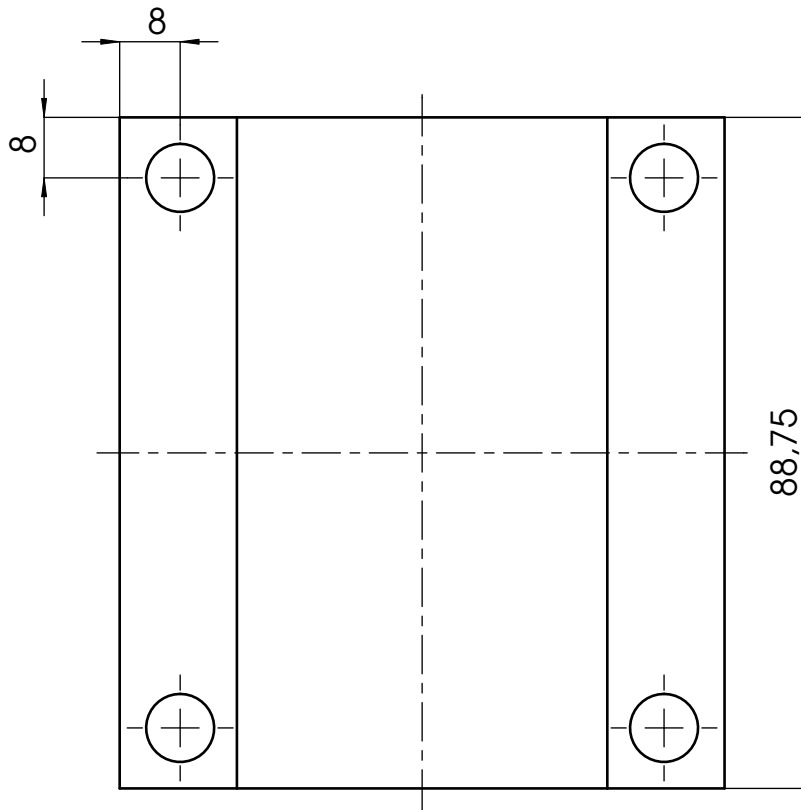


(Verwendungsbereich)				(Zul.Abw.) Klasse ISO 2768-mK		(Oberfl.)		Maßstab 1:1		0,2kg	
								Werkstoff: S235JR			
					Datum	Name		Schale Festeinspannung D _N =30mm			
				Bearb.	15.04.10	B.Wolter					
				Gepr.	00.00.00	Name					
				Norm							
Hochschule Mittweida						1012-10				Blatt 1/1	
										Blätter	
ors Lehlizen Lehrzwecke				Datum	Name	Ursprung	beschn	Ersatz für:		Ersatz durch:	

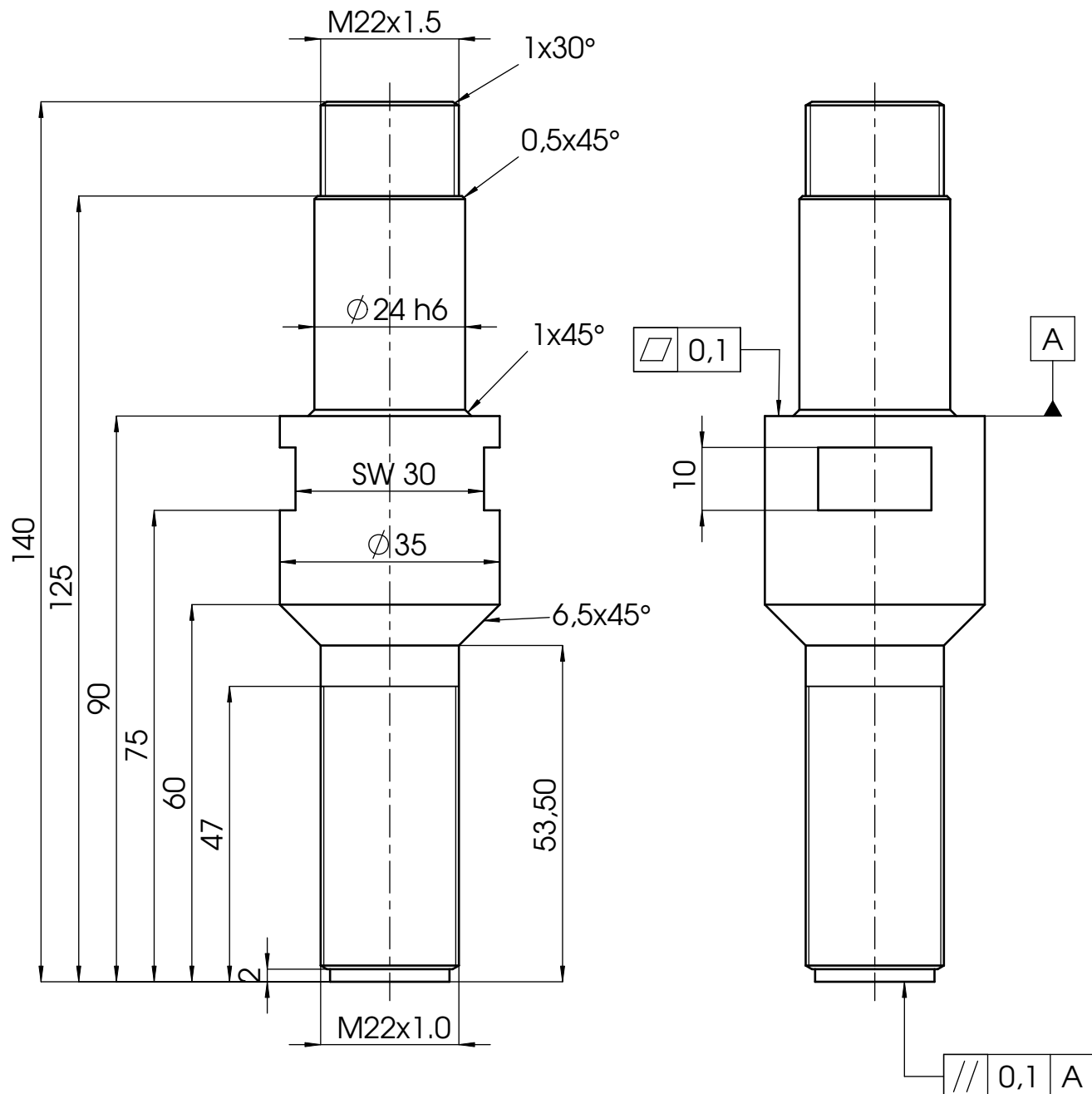


-0,3

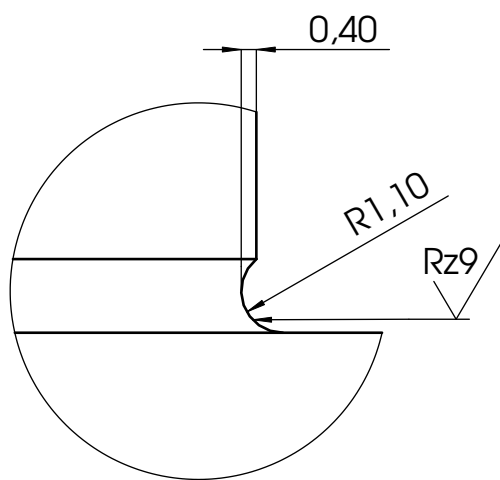
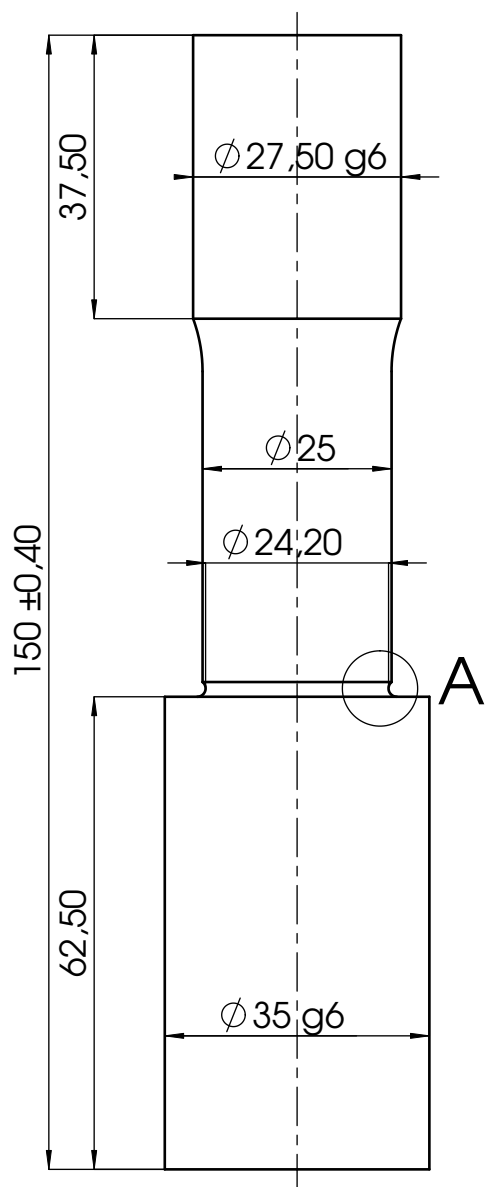
[illegible]




(Verwendungsbereich)				(Zul.Abw.) Klasse ISO 2768-mK		(Oberfl.)		Maßstab 1:1		1,3kg	
								Werkstoff:		34CrMo4	
					Datum	Name		Spannplatte Festeinspannung			
				Bearb.	15.04.10	B.Wolter					
				Gepr.	00.00.00	Name					
				Norm							
								1012-12			
orks Lehrlizenz Lehrzwecke					Hochschule 		Blatt 1/1				
					Mittweida						
	Datum	Name	Ursprung	beschn		Ersatz für:		Ersatz durch:		Blätter	

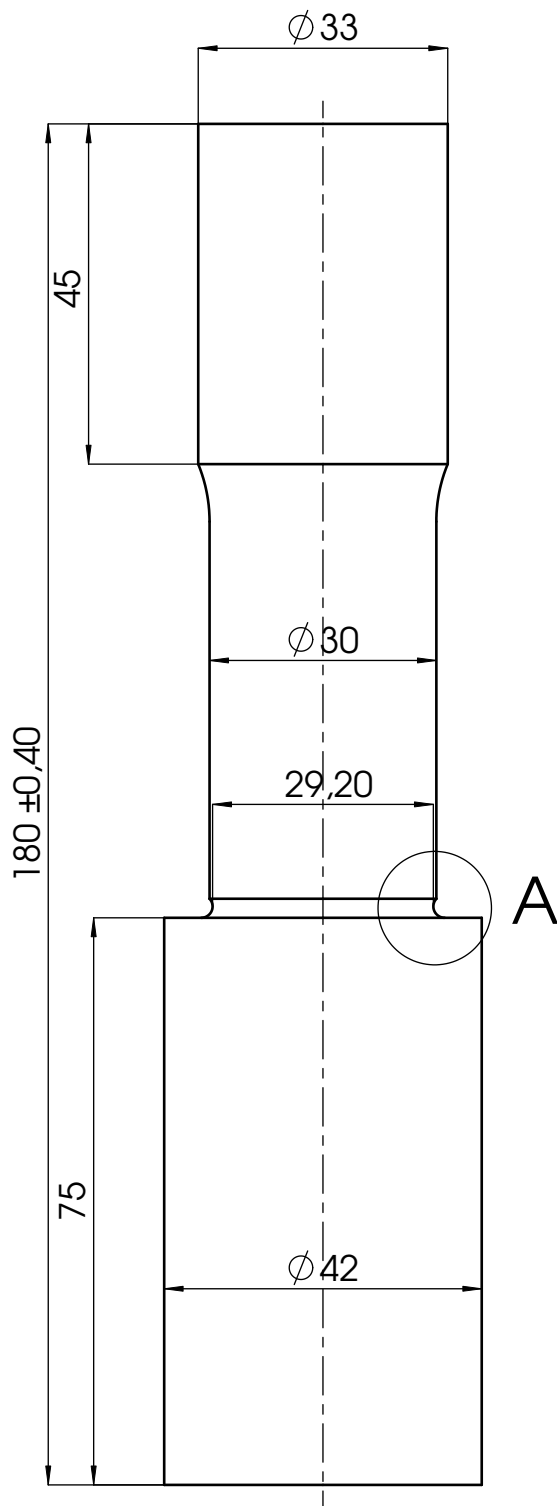


(Verwendungsbereich)				(Zul.Abw.) Klasse ISO 2768-mK		(Oberfl.)		Maßstab 1:1		0,6kg					
								Werkstoff:		34CrMo4					
					Datum	Name		Gewindezapfen Festeinspannung							
				Bearb.	15.04.10	B.Wolter									
				Gepr.	00.00.00	Name									
				Norm											
Hochschule Mittweida						1012-13				Blatt 1/1					
orks Lehlizen										Blätter					
Lehrzwecke				Datum		Name		Ursprung		beschn.		Ersatz für:		Ersatz durch:	



A (5 : 1)

(Verwendungsbereich)				(Zul.Abw.) Klasse ISO 2768-fH		(Oberfl.)		Maßstab 1:1		0,77kg	
								Werkstoff:		EN-GJS-800-8/EN-GJS-1000-5	
					Datum	Name		Probe ADI Guss D _{Nenn} =25mm			
				Bearb.	15.04.10	B.Wolter					
				Gepr.	00.00.00	Name					
				Norm							
				Hochschule				1012-14		Blatt 1/1	
				Mittweida						Blätter	
Arbeits Lehrzwecke				Datum	Name	Ursprung	beschn.	Ersatz für:		Ersatz durch:	



A (5 : 1)

(Verwendungsbereich)				(Zul.Abw.) Klasse ISO 2768-fH		(Oberfl.)	Maßstab 1:1	1,3kg
							Werkstoff: EN-GJS-800-8/EN-GJS-1000-5	
					Datum	Name	Probe ADI Guss D _{Nenn} =30mm	
				Bearb.	15.04.10	B.Wolter		
				Gepr.	00.00.00	Name		
				Norm				
				Hochschule Mittweida			1012-15	
							Blatt 1/1	
							Blätter	
				Datum	Name	Ursprung	beschn	Ersatz für: Ersatz durch:

VII Erklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Bearbeitungsort,

Datum Unterschrift